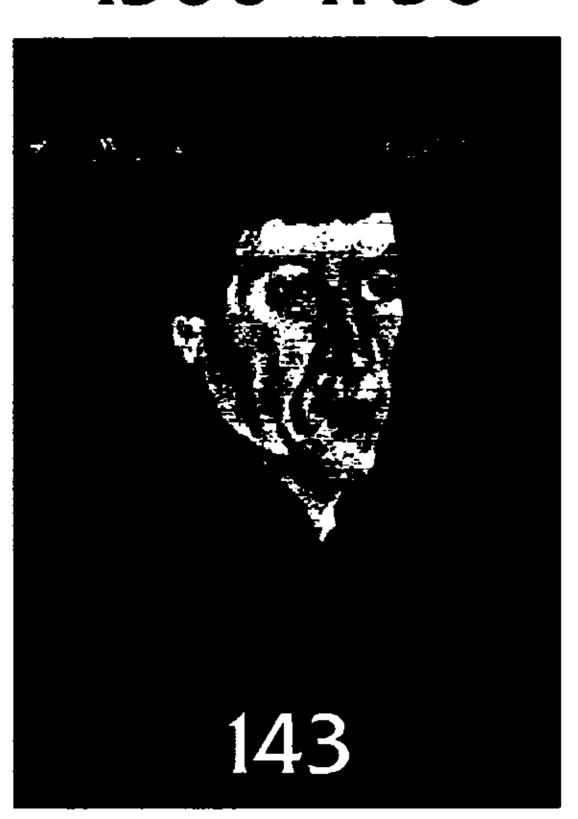
A. Rupert Hall

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA 1500-1750



CRÍTICA

A. RUPERT HALL

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA
1500-1750

Traducción castellana de
JORDI BELTRAN

EDITORIAL CRÍTICA
Grupo editorial Grijalbo
BARCELONA

Título original:
THE REVOLUTION IN SCIENCE 1500-1750

Cubierta: Enric Satué

ISBN: 84-7423-257-0
Depósito legal: B. 11.427-1985
Impreso en España
1985. — HUROPE, S. A., Recaredo, 2, 08005 Barcelona

PREFACIO

Es agradable repensar y reescribir una obra de tu juventud. The scientific revolution (1954) fue el fruto de mis primeros años dedicados a la enseñanza en Cambridge, donde mis mentores habían sido Herbert Butterfield, Alexandre Koyré, Joseph Needham y Charles Singer. Al echar la vista hacia atrás, es asombroso ver el volumen de sólida labor erudita que se ha hecho internacionalmente desde aquellos días y las grandes transformaciones que en el curso de casi treinta años han experimentado la investigación y la enseñanza de la historia de la ciencia.

En esta nueva versión de la obra citada trato de reflejar la mayor madurez de los estudios sobre la ciencia de los siglos XVI y XVII, estudios a la vez extensos y profundos. La profundidad documental y la riqueza técnica de las publicaciones recientes superan sobradamente a lo que era normal antes de 1960 y, por supuesto, no es posible reflejarlas de modo suficiente en un volumen refundido como el presente. Sin embargo, procuraré transmitir una parte del nuevo espíritu de esta rama de la historia.

Esta nueva versión concluye cerca de la mitad del siglo XVIII. Cuando murió Newton la gran fase creativa de la revolución científica ya había terminado, aunque aún no había sido aceptada y asimilada del todo. Por lo tanto, esta vez omitiré las fases subsiguientes del siglo XVIII durante las cuales las ciencias de la química y la electricidad adquirieron sus primeras formas coherentes. Por otra parte, he ampliado de otras maneras la visión histórica del libro. Los capítulos 9 y 10 contienen bastante material de la versión anterior, ya que no podía mejorarlo dentro del mismo alcance. Por lo demás, éste es un libro nuevo. Ya no son necesarias las bibliografías extensas,

de modo que me he limitado a dar entrada a la literatura reciente en las notas correspondientes a cada capítulo.

Agradezco a la editorial Longman la sugerencia de preparar una nueva versión de The scientific revolution *y doy las gracias a la señorita Fiona Cooper y a la señora Julie Hounslow por mecanografiar el resultado. Saludo a todos los colegas y amigos de quienes he aprendido o tomado algo en préstamo, especialmente a aquellos cuya amabilidad no se ha visto menoscabada por algunas discrepancias. Entre todos ellos vuelvo a citar a Joseph Needham, único superviviente de la era heroica de los decenios de 1920 y 1930, cuya inmensa erudición superará largamente la prueba del tiempo.*

A. R. H.

NOTA BIBLIOGRÁFICA

En la versión original del presente libro, *The scientific revolution, 1500-1800* (1954), así como en la segunda edición publicada en 1962, había una selección de obras de lectura recomendada. La mayoría de ellas siguen siendo útiles. Dos publicaciones recientes contienen numerosas remisiones a fuentes y literatura secundaria; se trata de Magda Whitrow, ed., *Isis Cumulative Bibliography* (5 vols.), y C. C. Gillispie (jefe de redacción), *Dictionary of Scientific Biography* (16 vols.). La revista *Isis* publica extensas bibliografías actuales.

INTRODUCCIÓN

La «revolución científica» del presente libro se refiere a las ciencias naturales, esto es, al conocimiento del mundo externo que actualmente suponemos que existe con independencia del hombre —aunque en el pasado reciente existía la creencia universal de que una de las mejores razones para estudiar la naturaleza era la íntima relación entre ésta y el hombre—, incluyendo el cuerpo humano, que puede investigarse objetivamente y que desde hace mucho tiempo se ha comparado con el cuerpo de los animales. No me ocuparé aquí de las ciencias de la mente y de la personalidad, ni de las sociales, como, por ejemplo, la antropología y la economía. Considerar la ciencia como conocimiento significa seguir las actividades y los escritos de hombres doctos: filósofos y matemáticos en los primeros siglos, astrónomos, naturalistas y químicos, como empezó a llamárseles en siglos posteriores. En general, no analizaré las creencias populares (pese a que muchas de ellas también hallaban aceptación entre algunos hombres doctos: la astrología y la brujería, por ejemplo), ni trataré de verificar hasta qué punto el dominio de las cosas vivas y los materiales naturales por parte del artesano expresaba un conocimiento de la naturaleza. Estos temas han sido investigados y vale la pena que así se haga, pero se apartan del nivel académico y culto a que quiero ceñirme en este libro. Tampoco es una muestra de esnobismo ocuparse de lo académico y descuidar lo popular. No es ninguna aberración moderna el que la imagen que el ciudadano corriente tiene del mundo en el que habita sea una popularización de la imagen de las lumbreras académicas; la mayor parte de la ciencia que se cita en las obras de Shakespeare se remonta a antecedentes clásicos y medievales perfectamente válidos. No es coincidencia que en tiempos de Shakespeare el conocimiento popular de la sexualidad y la reproducción procediera

de una obra titulada *La obra maestra de Aristóteles*, ni que la astrología popular del siglo XVIII llevase aún las señales de sus orígenes entre los matemáticos babilonios. Algunos ejemplos de conocimiento científico han brotado del suelo hacia arriba —el descubrimiento de la vacunación por Jenner es quizás el más famoso de ellos—, pero es incomparablemente mayor el número de creencias populares que se han sedimentado desde arriba. Asimismo, es en las obras eruditas donde el historiador encuentra la presentación más clara y lógica de la visión que una sociedad tiene de la naturaleza, incluyendo sus errores y supersticiones. A decir verdad, del mismo modo que los samoanos de hoy no podrían decirnos qué significaba crecer en Samoa hace cincuenta años, por lo que tenemos que recurrir a los estudios antropológicos de Margaret Mead, también la única manera de descubrir qué pensaban las personas corrientes del pasado consiste en recurrir a la constancia que de ello dejaron, tal vez sin darse cuenta, sus contemporáneos más cultos: escribanos, jueces, eruditos.

De modo parecido, al escribir sobre la revolución científica, hablaré poco de la visión total o parcialmente mágica de la naturaleza y no me explayaré en «seudociencias» como la astrología y la alquimia que la revolución científica tendió a desplazar o devaluar (todavía tienen partidarios). Esto no se debe a que las ideas mágicas, o las ideas herméticas, o los principios de la astrología y la alquimia no fueran estudiadas y explicadas por hombres de cultura impecable. Muy al contrario: algunas de las grandes figuras de la revolución científica, incluyendo a Kepler y Newton, se tomaban estas cosas en serio.[1] De hecho, algunos historiadores afirman que el interés que estos «modernos», como por lo demás podríamos considerarlos, mostraban por la alquimia o la astrología, por no hablar de los conceptos cristianos de la divinidad del origen y la gobernación del universo, afectaron profundamente su labor científica-técnica. Por ponerlo en el nivel más bajo, la forma en que el progreso del pensamiento va acompañado de una especie de atavismo, ta vez sin que el pensador progresista sea consciente de ello, ciertamente forma parte de la historia. Casi todos los pensadores revolucionarios —Newton, Robespierre, Florence Nightingale, Einstein— muestran algún tipo de apego profundo a algún orden de pensamiento más antiguo que parece casi

1. Véase B. J. T. Dobbs, *The foundations of Newton's alchemy*, Cambridge U. P., Cambridge, 1975.

inexplicable a las épocas posteriores. Habiendo rechazado tantos juguetes de la infancia intelectual, ¿por qué se aferraron a *ese*?

A este respecto, confieso sin vergüenza alguna que sigo una línea positivista e incluso *whig*, ya que en la misma oración no puede escribirse acerca de la visión que de la batalla tienen los vencedores y los vencidos. No creo que Copérnico sea una figura histórica importante porque nombrara una vez a Hermes, que el tratado de astrología de Kepler sea su obra más importante, que el nombre de Newton sea inmortal porque leyera a los alquimistas, ni que el hecho de que la señorita Nightingale rechazase los «gérmenes» fuera un error fatal para sus enseñanzas. He procurado analizar, poner en contexto, comprender la obra creativa de hombres y mujeres; si nos interesa la creatividad, debemos seguir en gran medida a los victoriosos y no a los derrotados. Hay que aceptar el atavismo, pero no suponerlo más interesante y significativo que la creatividad conducente al abandono de ideas tradicionales.

Que el historiador deje a sus colegas filosóficos la tarea de comentar lo que entraña realmente la consecución de la victoria gracias a un sistema científico o teoría en vez de otros: observará que a veces depende de la presentación de datos nuevos basados en hechos, o de la consideración de equivalencias y su plausibilidad (¿es más fácil creer que la Tierra se mueve que creer que se mueve el Sol?), otras veces de la preferencia por un concepto nuevo (como en el caso del «átomo» en el siglo XVII, no siempre «nuevo» en el sentido histórico más sencillo) o de la aceptación de argumentos matemáticos originales. Algunos historiadores dirían que los cambios de preferencia —cambios, a lo largo de un período de tiempo, en aquellas proposiciones que la gente está dispuesta a calificar de «evidentes», «plausibles», «racionales» o de otra forma parecida— están muy condicionados por experiencias o pensamientos sin ninguna relación directa con la ciencia y sus problemas. Lo que resultaba obvio para un cristiano medieval tal vez parecía sumamente discutible para un filósofo griego, por ejemplo; o cabría argüir que el conocimiento de las máquinas podría alterar las ideas sobre la física o incluso la biología; o, quizá de la forma más general de todas, algunos historiadores consideran una perogrullada que, del mismo modo que el estudio humano de la sociedad, sus costumbres y sus instituciones se ve hasta cierto punto influido cuando menos por los conocimientos científicos de los investigadores, también, a la inversa, las ideas que las personas ten-

gan de la sociedad pueden afectar sus ideas de la naturaleza. En el ejemplo más sencillo, el concepto de Dios como creador del universo ha sido generalizado partiendo de la experiencia humana de lo que representa hacer cosas: de manera que se decía (por analogía) que Dios tenía un propósito, que seguía un plan como podría seguirlo un constructor de barcos, etcétera, y que observaba del modo más elegante los principios geométricos. Prescindiendo de la verdad que haya en la opinión de que las creencias científicas de una sociedad son condicionadas por el contexto de esta sociedad misma —y la finalidad de este libro no es discutir este punto en uno u otro sentido—, es innegable que, en términos generales, todos los grandes grupos de personas que estudiemos tienen su «propia idea de la naturaleza» [2] dentro de la cual hay una serie de creencias concretas, más o menos consecuentes, relativas a la materia y la creación, las estrellas y las cosas vivas. Así, muchos de los griegos, especialmente los dos gigantes, Aristóteles y Galeno, consideraban que todo el universo era orgánico, un conjunto que había crecido y se había desarrollado de modo muy parecido a como lo hace una cosa viva, que poseía un impulso interno, predominante, de propia conservación como cosa viva, por lo que ninguno de sus acontecimientos podía ser arbitrario, estocástico o suicida. Para los cristianos medievales el universo era sencillamente el teatro donde se representaba el drama de la caída y la redención del hombre: de aquí, por ejemplo, la creencia, que duró hasta el principio de los tiempos modernos, de que todas las especies vivas fueron creadas para que el hombre las usase de una forma u otra. Los últimos dos siglos y medio han sido testigos del predominio de una idea de la naturaleza que se aparta mucho de las que acabamos de citar, puesto que se ve a la naturaleza como el producto —quizás un producto fortuito en zonas locales como nuestro planeta— de cadenas fortuitas nacidas de la primera constitución de la existencia. Así, pues, a un nivel la revolución científica es el fenómeno del desplazamiento —todavía parcial, es decir, incompleto— de una idea de la naturaleza por otra idea; de una «visión del mundo» por otra. La teleología —la creencia de que la naturaleza de una cosa hay que explicarla por su excelencia en ser lo que es— se ve debilitada; la significación de los fenómenos que surge de la lógica de la estructura del universo y las «leyes de la naturaleza» se ve reforzada.

2. R. J. Collingwood, *The idea of nature*, Clarendon Press, Oxford, 1945.

Pero la revolución científica es más que esto: no es sencillamente análoga a la sustitución de la estética barroca por la romántica: el observador no puede limitarse a decir «cada una de ellas es perfectamente válida en sus propios términos». La ciencia de 1750 era aún rudimentaria, pero también podrá describir y explicar racionalmente muchos más acontecimientos naturales que la ciencia de 1500. Se sabía mucho más acerca del universo —por citar un solo ejemplo: que algunas estrellas muestran cuando menos ciclos de cambio observables, y alteración de su posición y, por ende, no son eternamente constantes como siempre se había creído— y el conjunto encajó en una pauta de pensamiento más satisfactorio. Por supuesto, si pueden hacerse estas comparaciones, es sólo porque la naturaleza de lo que se estudiaba era la misma y porque lo que contaba como explicación todavía era (hasta cierto punto) lo mismo: donde no es posible el diálogo entre dos filósofos o, como diríamos ahora, entre dos científicos, tampoco se puede afirmar que uno ha avanzado intelectualmente más que el otro. Como es obvio, en sentido absoluto no se puede decir nunca que en la sucesión de teorías científicas a través del tiempo —supongamos, para concretar, las teorías relativas a la influencia de los progenitores masculinos y femeninos en la morfología y el comportamiento de sus vástagos— cada «modelo» se haya acercado sucesivamente más a la realidad, aunque sólo sea porque no sabemos qué es la «realidad» ni confiemos en llegar a saberlo alguna vez. Pero podemos estar seguros de que tanto si nuestro conocimiento actual (o, de hecho, el de 1750) es o no más «real», ciertamente su contenido basado en datos es mucho más rico que el del 1500, de que las teorías están estructuradas de una manera mucho más sutil, de que su integración con otros campos del saber (la química, la física, etc.) es incomparablemente mayor y, finalmente, de que permite predecir con mayor exactitud acontecimientos futuros partiendo de determinados antecedentes. A esto podemos llamarlo progreso y también podemos creer confiadamente que en los sistemas de conocimiento científico el progreso puede medirse en términos totalmente independientes de los juicios de valor. No es sencillamente un juicio de valor mantener que la teoría newtoniana del universo es superior a la aristotélica, un tipo más avanzado de teoría; porque la teoría newtoniana es más grande, más exacta, puede comprobarse con mayor precisión y, sobre todo, más matemática que su predecesora.

Aunque no forma menos parte de una visión del mundo que los

sistemas científicos del pasado, la ciencia moderna se diferencia notablemente de todos ellos. Exige criterios rigurosos en la observación y los experimentos. Excluye los agentes espirituales de su esfera y acepta un materialismo puro, pero estas características de la ciencia no se establecieron definitivamente hasta finales del siglo XIX. Distingue entre teorías confirmadas, hipótesis plausibles y especulaciones tentativas: tres grados de confianza y tal vez, a la inversa, tres grados distintos de estímulo intelectual. Es sumamente matemática en su estructura y argumentos. En la ciencia moderna una buena teoría es general, pero también ha de ser precisa, pues probablemente la mayoría de los científicos estarían de acuerdo en que la mejor prueba de una teoría es la verificación de las conclusiones (predicciones) extraídas de ella. Además, las teorías incitan a la investigación y los frutos de ésta imponen la formulación de teorías; hay campos «inactivos» de la ciencia donde todo es fijo con la rigidez de los libros de texto, pero en los campos activos donde la investigación es más animada el cambio ha tendido a ser cada vez más rápido. Estas características se adquirieron mediante el estudio de la naturaleza durante el período de transición que desde finales del siglo XVII se denomina por conveniencia la «revolución científica» y se retuvieron mediante el desarrollo detallado tanto del conocimiento basado en datos como de su ordenamiento teórico.

Es pertinente tratar de definir, en términos generales, la fuerza y el carácter de esta revolución. Al concluir la Edad Media el hombre tenía firmemente establecida su visión del mundo externo y confiaba en ella; expresada en numerosos libros doctos y en varios libros populares, algunos de los cuales (de ambas clases) ya se habían publicado antes de finalizar el siglo XV, esta visión, según la suposición general, estaba autentificada por el hecho de proceder del mundo grecorromano, en el cual habían florecido los mejores intelectos de la humanidad y los hombres se habían acercado a la verdad más que en cualquier otro momento anterior o posterior. Pero esto no era todo, pues la era clásica había presenciado también las mayores hazañas de la habilidad y el ingenio humanos de que se tiene constancia. Sin embargo, las gentes de la Edad Media reconocían, como antes hicieran sus predecesores de la antigüedad, que la fabricación de herramientas y las artes útiles habían partido de unos comienzos invisibles en el alba de la humanidad, mientras que, al parecer, la consideración filosófica y matemática de la naturaleza no había empezado hasta los griegos

del siglo v, alcanzando una rápida madurez en los escritos de Aristóteles (384-322 a. C.) y Euclides (*c.* 300 a. C.). En virtud de una de las coincidencias más extraordinarias de la historia, en el siglo VI antes de Jesucristo «estamos entrando en el mayor período de florecimiento intelectual de la antigua China. Las "cien escuelas" de filósofos alcanzaron su apogeo entre —500 y —250» (Joseph Needham).[3] Pero de la historia intelectual china el Occidente medieval, a pesar de Marco Polo, no sabía nada. De modo parecido, el conocimiento de la filosofía, la medicina y la ciencia pregriegas estaba limitado a rumores de sabios fenicios y egipcios, el más célebre de los cuales era un tal Moschus, al que a veces se identifica con Moisés. A estos sabios misteriosos no se les consideraba médicos ni astrónomos —pues los comienzos sólidos de estas ciencias en Egipto y Babilonia no se redescubrirían hasta el siglo XIX—, sino como magos, por su habilidad esotérica para leer las estrellas y controlar los agentes naturales.

Resumiendo, la visión del mundo tenía, en la baja Edad Media, cuatro componentes, todos los cuales se remontaban supuestamente (y en realidad) al mundo antiguo: el *técnico*, dominio de fuerzas y materiales, del viento, el agua, los metales, la madera y la piedra, en todo lo cual se habían hecho recientemente progresos muy rápidos y efectivos; el *filosófico*, del que cabe considerar la medicina como parte, que abordaba los problemas más generales sobre la naturaleza del mundo en que vivimos y se basaba firmemente en los libros de texto de autores griegos, latinos e islámicos que se leían en las escuelas y universidades; el *matemático* (incluyendo la astronomía), menos prestigioso que la filosofía (pero sirviéndola del mismo modo que, a través de la astrología, servía también a la medicina) y limitado en sus ramas más avanzadas a reducidos grupos de expertos; y finalmente las *artes herméticas* o *mágicas*, temidas por casi todos, conocidas (al menos según se dice) por muchos, profesadas abiertamente por unos pocos. Había vínculos, por supuesto, entre estas formas diferentes del conocimiento: tanto astrónomos como filósofos hablaban de los cielos y los primeros aconsejaban a los navegantes y exploradores sobre qué debían hacer para recorrer y explorar la superficie del globo; las matemáticas estaban estrechamente aliadas a la

3. Joseph Needham, *Science and civilization in China*, Cambridge U. P., Cambridge, 1954, p. 95.

magia (a la gente exageradamente supersticiosa todas las cifras y símbolos matemáticos le parecían cabalísticos), del mismo modo que la filosofía, por considerar el cambio cualitativo, era aliada de la alquimia. Arquitectos y artistas, pese a ser artesanos en la jerarquía social de la baja Edad Media y del Renacimiento, podían convertirse en hombres doctos, como hicieron Alberti y Leonardo da Vinci por medio de sus estudios; lo mismo cabe decir de los impresores. Esto contribuía a la fertilidad y a la riqueza de ideas, pero también a la confusión: lo que parecía ser un argumento decisivo acerca de la naturaleza de las cosas lo mismo podía depender de una cita de alguna autoridad antigua que de una supuesta muestra de experiencia común, del testimonio de viajeros o de supuestos experimentadores cuyos relatos no podían verificarse fácilmente, o, en raras ocasiones, de una demostración geométrica. Debido a que los argumentos tan pronto daban importancia a un tipo de datos como a otro, era difícil llegar a conclusiones sólidas, a lo que contribuía en no poca medida el hecho de que la autoridad escrita, cuando se recurría a ella, distaba mucho de ser unánime, y al hecho de que la experiencia temporal del mundo real no cuadraba exactamente con los informes de los antiguos.

Por encima y más allá de todas las formas de autoridad estaba la verdad religiosa, que también se expresaba en diversas fuentes, en el Antiguo Testamento y en el Nuevo, en los escritos de los Padres de la Iglesia, en las proclamas de los pontífices y los concilios, y que, ciertamente, distaba de ser clara como el cristal. La salvación al final de su vida era el único objetivo importante que debía fijarse un hombre racional; la destrucción antes de que los hombres fueran juzgados sería el destino del universo material. Toda la autoridad estaba de acuerdo en que el mundo había existido durante mucho tiempo en términos de vidas humanas —varios miles de años— pero que probablemente tenía poco futuro, toda vez que Dios pronto cumpliría su propósito en relación con el género humano. El sentido de una existencia de las cosas en el tiempo, exceptuando este reducido tiempo humano de cien generaciones y pico, estaba absolutamente ausente, como, a decir verdad, también lo había estado en la antigüedad; hasta parecía que el mundo hubiese sido creado perfecto y que luego se hubiera deteriorado poco a poco, en parte a causa del desgaste de los años, en parte debido a la terquedad y a la codicia del hombre. Hubiera sido absurdo concebir el universo sin el hombre, para el

que fue creado, y, por ende, impío concebirlo sin Dios. Incluso el intento de distinguir un acontecimiento natural de una intervención divina llevaba aparejadas consideraciones teológicas: y no podía haber nada de *ciencia* hasta que se hubiese establecido esta distinción. El árabe dice: «Imshallah: es la voluntad de Dios»: ¿dónde iba a decir apropiadamente el cristiano: «así es el mundo»? En cierto sentido, ésta era la pregunta en torno a la cual giraba todo: podría decirse que el presente libro trata de la victoria de la racionalidad sobre la religiosidad. Pero en verdad la situación en el siglo XV no era ni con mucho tan desesperada como semejante antítesis podía inducir a pensar, aunque había sido realmente desesperada en la alta Edad Media, poco después de la caída del imperio romano. Los escasos vestigios de la cultura antigua que a la sazón existían, y su tremendo y rápido renacer en los siglos XII y XIII, habían devuelto a Europa una racionalidad y una pericia intelectual precristianas —junto con mucha información objetiva sobre la naturaleza— que se injertaron en la teología cristiana y formaron una incómoda amalgama. Si fuera posible comentar los sacramentos en términos de la filosofía cualitativa aristotélica, ni siquiera santo Tomás de Aquino conseguiría que Aristóteles declarase que el universo no era eterno. Se habían producido fuertes reacciones contra la cultura greco-árabe: las doctrinas de Aristóteles fueron condenadas muchas veces en el siglo XIII, mientras que Averroes, un musulmán español que había llevado las posturas aristotélicas hasta el extremo, nunca llegaría a ser verdaderamente respetable en el Occidente cristiano. Debido a que la inmensa mayoría de los hombres doctos eran clérigos, que los torpes textos aristotélicos podían expurgarse o enterrarse debajo de una invocación de autoridad espiritual y que podía alcanzarse una síntesis armoniosa y, al parecer, inmensamente provechosa, estas tensiones eran más latentes que apremiantes: pero seguía siendo verdad que las epistemologías griega y cristiana eran, y son, irreconciliables; cuando las tensiones volvieron a aparecer con el resurgir del platonismo a mediados del siglo XV, el resultado fue en parte creativo, en parte obstructor.

Finalmente, podríamos preguntar *para* qué la Europa de la baja Edad Media quería el tipo de conocimiento que calificamos de científico. Lo cierto es que, en general, no lo quería por su utilidad práctica. De todas las ramas del saber sólo la medicina reconocía la distinción entre *episteme* y *techné*, la distinción entre el conocimiento

teórico y la habilidad práctica que nos es tan conocida: y las universidades, como es natural, daban mayor importancia a la primera. Fuera de los estudios académicos los que cultivaban las artes esotéricas también invocaban la idea de que el conocimiento da poder; el mago que entendía la naturaleza de las misteriosas fuerzas ocultas también podía dominarlas. Las matemáticas también aparecían como poseedoras de algunas aplicaciones útiles —la relación de la aritmética con las cuentas mercantiles y la de la geometría con la arquitectura es muy clara, por ejemplo, en los escritos de la baja Edad Media—, pero esta idea no se hizo del todo evidente hasta el siglo XV, como rasgo de la mentalidad renacentista, sobre todo después del «redescubrimiento» en 1414 del libro de Vitrubio sobre arquitectura (el más antiguo de los manuscritos existentes había sido transcrito en el monasterio de Beda en Jarrow en el siglo IX). Vitrubio había catalogado las ramas útiles de las matemáticas de un modo que resultó muy popular entre los eruditos renacentistas como John Dee (en su prefacio a *The English Euclid*, de Billingsley, 1570). La astronomía, como ya he señalado, fue padrina de la astrología y, por consiguiente, revestía importancia profesional para los médicos, entre otros. Pero las matemáticas propiamente dichas eran una ciencia que no tenía aplicación, mientras que el saber superior de la filosofía, que se extendía hasta lejos a través de los escritos de Aristóteles y de todos sus comentaristas, condujo a la teología.

Los hombres cultivaban la filosofía —y sabemos que en las universidades medievales la filosofía se estudiaba ávidamente— porque allí donde haya libros siempre habrá lectores, porque (en algunas de sus ramas) prometía técnicas intelectuales de aplicación universal que podían ayudar a clarificar los misterios del cristianismo, porque (en otras ramas) ofrecía una visión clara de los problemas eternos de la existencia y la finalidad, de la continuidad y el cambio, y del orden o armonía que seguramente hay debajo del caos y la casualidad aparentes del mundo de la experiencia, y porque (en otras ramas) ofrecía consejos para comprender las vicisitudes de la vida social y política. La filosofía era sabiduría secular, la sabiduría de este mundo temporal (motivo por el cual los puntos de vista de los autores paganos podían tratarse con respeto) del mismo modo que la teología era la sabiduría del mundo eterno. Los estudios de ambas cosas se encontraban inevitablemente; la Biblia relataba ciertas cosas que había que creer acerca de este mundo temporal —como, por ejemplo, que nues-

tra Tierra está fijada por su centro, aunque, como ya comentó Oresme alrededor de 1370, la razón a solas podía llevarnos a la conclusión de que se mueve como un planeta, si la Autoridad no nos salvara de este error— y, por supuesto, la religión también tenía mucho que decir acerca de la moralidad y la conducta humana. De un modo muy crudo, cabría decir que la filosofía llegó a ser la más importante de las disciplinas que se estudiaban en las universidades medievales, lo cual era debido a san Pablo y los Padres, que habían hecho del cristianismo una religión intelectual, en vez de ser sencillamente una cuestión de fe y esperanza en el mensaje de Jesús; después de todo, lo que había causado la trascendental división de las iglesias occidental y oriental era una cuestión de filosofía más que algo relacionado con la historia de Jesús y su mensaje. No obstante, si la justificación más obvia del estudio de los filósofos paganos se encontraba en la naturaleza de la religión, por paradójico que esto pueda parecer (y de vez en cuando surgían reformadores vehementes y simplistas que lo denunciaban), es más razonable suponer que era la fascinación intrínseca, aclaratoria del conocimiento natural lo que atraía a algunos hombres, aunque fueran relativamente pocos, a este aspecto de la filosofía. Algunos (quizás entre ellos podamos incluir al emperador Federico II) se sentían atraídos por la enorme variedad y la extraña curiosidad de la naturaleza y la belleza estética de las cosas vivas; otros, por medio de la mecánica de la definición y la lógica, buscaban la máxima precisión de las ideas y el rigor para deducir conclusiones relacionadas con problemas de movimiento y cambio; otros, edificando sobre la obra de un gran autor iraquí, Ibn al-Haytam, al que llamaban Alhazen (*c.* 965-1040), se zambulleron en los misterios de la luz, íntimamente relacionados con las manifestaciones de Dios ante el hombre. A la mayoría les interesaba, al menos hasta cierto punto, la cuestión más profunda de todas: ¿cómo pueden los hombres formarse una imagen coherente, racional del mundo externo siendo éste tan enorme y en parte inaccesible, y hallándose en constante proceso de cambio?

Es cierto que era una investigación libresca y literaria que llevaban a cabo los académicos con fines didácticos. El cálculo tenía su lugar en ella —de hecho, Richard Swineshead, el filósofo inglés del siglo XIV, pasó a la posteridad con el nombre de «Calculador» porque «las funciones y consideraciones matemáticas impregnan [su] obra

principal» (Murdoch)—,[4] pero esta filosofía siempre se distinguió de las matemáticas. El punto de partida de la mayoría de las investigaciones se encontraba en algún autor griego o árabe, aunque, a decir verdad, el filósofo latino podía dejar esto muy atrás; todos los hechos, argumentos y principios de explicación eran de prestado y todo el saber era en esencia un comentario y una elucidación de lo que habían escrito anteriormente los hombres doctos de mayor talento. Por medio de grandes tratados se seguían los análisis refinados y el delicado trazado de distinciones sin ver el mundo real desde una perspectiva nueva; de hecho, gran parte de la «filosofía natural» de la Edad Media (incluyendo la del «Calculador») se ocupa de experimentos relacionados con el pensamiento. Puede que sea mentira que santo Tomás de Aquino reflexionase sobre cuántos ángeles cabían en la punta de un alfiler, pero no hay duda de que se hizo la siguiente pregunta: ¿qué le sucedería a una piedra que cayese en el hueco entre las dos mitades de la Tierra, si ésta pudiera dividirse y las dos partes quedasen separadas por un pie? Hay pruebas de que se llevaban a cabo observaciones muy pequeñas, de primera mano, de animales y plantas en medio de la falta casi total de interés por las cosas vivas; y es indudable que se realizaban experimentos en la tradición óptica. Otro gran momento del empirismo fue *Epístola sobre el imán* de Petrus Peregrinus, de 1269. Ciertamente, los lógicos medievales aceptaban la observación directa como prueba de la veracidad de una proposición y reconocían que podía formularse una generalización por inducción partiendo de observaciones repetidas; pero la aplicación de semejante metodología a más de uno o dos casos excepcionales tuvo que esperar hasta la revolución científica.[5] La investigación de fenómenos era un ejercicio intelectual que debía hacerse sobre el papel y no un ejercicio experimental que tenía que llevarse a cabo buscando información nueva. Durante la Edad Media hubo tres grandes innovaciones técnicas que podríamos calificar de «científicas»: la utilización de la pólvora, de la brújula y de las gafas. Las dos primeras se introdujeron en Europa desde, en última instancia, China; la última nació del interés que los filósofos latinos sentían por la luz y la visión, que les hizo reparar en que Alhazen había utilizado lentes

4. *Dictionary of scientific biography*, XIII, p. 208, col. 2.
5. A. C. Crombie, *Robert Grosseteste and the origins of experimental science*, Clarendon Press, Oxford, 1953.

de aumento primitivos. Con todo, parece ser que la invención de las gafas se la debemos a algún hombre sensato y astuto y, ciertamente, no a una de las grandes autoridades de la óptica, Roger Bacon por ejemplo.[6]

¿En qué cambió el carácter del saber, especialmente en los siglos XV y XVI? Algunos de los cambios de perspectiva son muy sutiles: sería ciertamente una equivocación suponer que los filósofos de la naturaleza en 1600 eran cristianos menos devotos que los de tres siglos antes, pero en aquel período el cristianismo occidental y sus relaciones con la filosofía habían experimentado cambios profundos. Por otra parte, simplificaríamos demasiado si presentáramos la revolución científica como una revuelta contra Aristóteles, pues, por el contrario, las ideas y el ejemplo aristotélicos todavía podían estimular la innovación creativa, como en el caso de William Harvey. Sin embargo, algunos aspectos son bastante obvios y de gran alcance. Tal vez lo más importante de todo fuera el cambio habido en la base cultural. La mayor parte de la herencia intelectual de la Edad Media la habían formado los traductores del siglo XII que trabajaban en Toledo y otros centros de habilidad multilingüe: traducciones posteriores, y mejores (como las que Guillermo de Moerbeke hizo directamente del griego al latín para santo Tomás de Aquino), tendían a tener poca circulación, y lo que no se tradujo al principio, como las obras de Arquímedes y la preponderancia de Galeno, no formó parte de la citada herencia. De este modo se perdió gran parte de la mejor ciencia técnica de los griegos, aunque los comentarios árabes sobre ella estaban mucho mejor representados. Del Doctor en Medicina que aparece en los *Cuentos de Canterbury* Chaucer escribió:

Bien conocían al viejo Esculapius,
y a Deyscorides, y a Rufus,
al viejo Ypocras, Haly y Galyen,
Serapion, Razis y Avicen,
Averrois, Damascien y Constantyn,
Bernard y Gatesden y Gilbertyn.

Quince autoridades, sus nombres más o menos corrompidos: cinco griegos (uno de ellos mítico, por supuesto), siete árabes, un fran-

6. Edward Rosen, «The invention of eyeglasses», en *Jour. Hist. Medicine and Allied Sciences*, XI, 1956, pp. 13-46, 183-218.

cés y dos ingleses. El contingente árabe era el más numeroso y con mucho el más voluminoso. El Renacimiento hizo que saliera a la luz una inmensa cantidad de literatura clásica olvidada —gran parte de ella transcrita en los siglos inmediatamente posteriores a la invasión de los bárbaros— en los griegos Arquímedes, Galeno, Ptolomeo, Platón, en los latinos Celso y Lucrecio, por ejemplo. La lengua griega, casi olvidada en la Europa occidental, resucitó y dio a los estudiosos una sensación de contacto inmediato y vívido con la más filosófica de las sociedades antiguas.

Los árabes se vieron injustamente arrinconados y tachados de simples chapuceros. El médico y teólogo radical Miguel Servet escribe (1537) acerca de la brillantez de Galeno, quien, «otrora vergonzosamente incomprendido, ha renacido y se acredita de nuevo para brillar con su esplendor de antaño» y quien «ha liberado la ciudadela que había estado en poder de las fuerzas de los árabes y purificado las cosas mancilladas por las sórdidas corrupciones de los bárbaros».[7] Los filósofos renacentistas coincidían plenamente con los medievales en que el hombre moderno debía buscar una base firme en las enseñanzas de la antigüedad, pero debía buscarla directamente, haciendo caso omiso de todo lo escrito entre medias, y de una manera menos restringida. El héroe del Renacimiento fue Platón, más que Aristóteles, especialmente en Toscana; de manera análoga, pero más adelante, otros tomaron el atomismo de Epicuro y Lucrecio con preferencia a la teoría cualitativa de Aristóteles. Dioscórides fue otro de los grandes héroes: la botánica del siglo XVI se fundó en el estudio de sus obras. Se leía y citaba a los filósofos presocráticos, así como a los pitagóricos. Copérnico encontró en Plutarco —otro descubrimiento renacentista— y citó en griego la información de que el pitagórico Filolao suponía que la Tierra se movía, como hicieran también Heráclides y Ecfanto; también hace alusión a Aristarco de Samos, Anaxágoras, Empédocles y Leucipo, demostrando con ello su conocimiento de una gran tradición que la Edad Media virtualmente nunca había tenido en cuenta. Nuevos horizontes trajeron nuevas variedades de pensamiento y nuevos problemas que desenmarañar.

La más poderosa influencia filosófica que se hizo sentir en el siglo XV, la de Platón, empujó a la gente hacia las matemáticas; no

7. «The Syrups», en C. D. O'Malley, *Michael Servetus*, American Philosophical Society, Filadelfia, 1953, pp. 60-61.

saber geometría era una vergüenza. El redescubrimiento de las antiguas matemáticas puras y aplicadas empujaba en la misma dirección. En los mil años o más transcurridos desde el final de las matemáticas griegas, un marciano que quisiera encontrar un genio matemático hubiese tenido que buscar en la India (especialmente), en China o en el islam, pero no en Europa. Todo esto iba a cambiar: las matemáticas propiamente dichas y su pariente próximo, la astronomía, florecerían con una rapidez insólita en Europa. El álgebra por un lado y la trigonometría por el otro hicieron grandes progresos al mismo tiempo que las matemáticas eran aplaudidas por doquier como la clave de la navegación y la exploración, de la ciencia militar, de la geografía (que se estaba librando rápidamente del legado de los cuentos de los viajeros) e incluso de la estética. Niccolò Tartaglia (1500-1557) ilustra todas las nuevas tendencias en sus escritos: fue el primero en brindar la solución de las ecuaciones cúbicas, estudió la trayectoria de los proyectiles y produjo la primera edición de Arquímedes. Sin embargo, el mayor interés general lo tiene la idea de que las matemáticas ofrecen una clave sin igual para comprender la naturaleza de las cosas; con todo, ésta no era una idea *única*, toda vez que poseía dos ramas principales y distintas: en primer lugar, el convencimiento de que la naturaleza es inherentemente matemática, porque Dios geometriza eternamente o, como dice Leonardo da Vinci, «la proporción no sólo se encuentra en los números y las medidas, sino también en los sonidos, los pesos, los tiempos, las posiciones y en cualquier facultad que fuere». Esto quiere decir que no sólo podemos esperar que la naturaleza esté ordenada racionalmente de algún modo porque, de no estarlo, sería inútil tratar de entenderla y porque (como recalcó Descartes), de no estarlo, Dios estaría engañando a los hombres, lo cual es imposibe, sino que también podemos esperar que esta racionalidad esté realizada matemáticamente. Y, en segundo lugar, existe el convencimiento puramente lógico de que el razonamiento matemático es el más seguro de los que disponemos; citando de nuevo a Leonardo: «No hay ninguna certeza allí donde uno no puede aplicar ninguna de las ciencias matemáticas ni ninguna de aquellas que se basan en las ciencias matemáticas».[8] Galileo, entre muchos otros, también puso de relieve estas dos características de las mate-

8. Edward MacCurdy, *The notebooks of Leonardo da Vinci*, Cape, Londres, 1948, I, pp. 634, 636.

máticas: él creía que el Libro de la Naturaleza está escrito en la lengua de la geometría y también opinaba que la prueba matemática de una proposición es, lógicamente, la mejor que podemos tener. Ninguna de estas tesis se tenían en cuenta en la antigüedad; no es que la fuerza de, por ejemplo, una demostración geométrica se considerase más dudosa en la antigüedad que en los tiempos modernos, sino que se trata más bien de que los antiguos suponían que el razonamiento de tipo matemático era inapropiado fuera de los contextos estrictamente matemáticos (uno puede comparar esto con el moderno bulo según el cual hay mentiras, mentiras redomadas y estadísticas). Había buenos motivos para este punto de vista aparentemente perverso: la conclusión física de un argumento formulado matemáticamente es sólo tan buena como las premisas físicas en que se basa; no es lícito argüir que una conclusión física tiene que ser cierta porque el argumento matemático es bueno. Los filósofos griegos afirmaban que los axiomas físicos postulados por los matemáticos —como, por ejemplo, que los planetas se mueven de manera uniforme en órbitas perfectamente circulares— eran tan inciertos o, para ser más exactos, ofrecían una variedad tan grande de interpretaciones, que no era posible creer confiadamente en nada que se basara en ellos. Comprendían (correctamente) que pueden construirse modelos matemáticos diferentes en correspondencia con los mismos principios físicos, y que estos modelos diferentes pueden —de hecho, para ser comparables, deben— generar numerosas conclusiones o predicciones idénticas. (En principio, cabe que pueda descubrirse una infinidad de tales modelos matemáticos equivalentes.) En consecuencia, siendo incapaces de decidir si en el cielo existen realmente (pongamos por caso) círculos excéntricos o epiciclos, los antiguos rechazaban las matemáticas como guía para llegar a la verdad, excepto, tal vez, heurísticamente. Al parecer, un análisis literario superaba a un análisis numérico en probabilidades de dar una respuesta en la que se pudiera confiar: es decir, las imágenes verbales parecían más definibles y, por lo tanto, más realistas que los modelos matemáticos. El matemático de la antigüedad, además, sólo podía tratar aspectos más bien simples y estrechos de un tema: círculos en astronomía, rayos de línea recta en óptica y perspectiva, proporciones en música; y la realidad parecía siempre más rica y sutil que estas abstracciones artificiales. En música, por ejemplo, las notas del ejecutante parecen fundirse armoniosamente unas con otras, aunque los matemáticos (aquí, una vez

más, Ptolomeo) enseñan que es imposible dividir la octava en ocho notas iguales. El griego, resumiendo, sabía muy bien que los elementos teóricos empleados en un modelo matemático pueden no existir y que el modelo ofrece únicamente una explicación *posible*, no *definitiva*, del fenómeno: como dice el comentarista aristotélico Simplicio, los astrónomos

> no han podido establecer en qué sentido, exactamente, las consecuencias que entrañan [sus] disposiciones [geométricas] son meramente imaginarias y en absoluto reales. De modo que se contentan con afirmar que es posible, por medio de movimientos circulares y uniformes, siempre en la misma dirección, salvar los movimientos aparentes de las estrellas errantes.[9]

Dicho de otro modo, la ciencia matemática no podía explicar las cosas revelando la estructura de la realidad y su lógica interior; sólo podía dar la posibilidad de predecir los resultados futuros partiendo de antecedentes establecidos.

Desde entonces se han seguido debatiendo los modelos matemáticos y su acceso a la realidad. Durante el Renacimiento, no obstante, muchos matemáticos como Copérnico y Kepler y algunos filósofos como Galileo sancionaron un punto de vista que era tal vez más ingenuo que el de los griegos, pero que también era mucho más creativo, como hemos visto en Leonardo. Afirmar que ninguna teoría sobre la realidad puede existir en forma matemática es una restricción paralizante; el Renacimiento rechazó esta restricción, afirmando que era una empresa útil buscar teorías matemáticas a las que también —en virtud de criterios metafísicos— pudiera suponerse «reales». El principal ejemplo de esto es Copérnico, que explicó que había abandonado todas las teorías matemáticas que existían sobre el movimiento planetario no porque fueran incapaces de «salvar los fenómenos», sino porque (siendo a la vez incompletas y contradictorias) no ofrecían una descripción real de los cielos; sin embargo, la teoría matemática basada en la hipótesis de movimiento de la Tierra es no menos válida matemáticamente para «salvar los fenómenos», es congruente y tiene otras ventajas tales como la de situar definitivamente todos los planetas en un orden espacial; puede, por consiguiente, tomarse como

9. P. Duhem, *To save the phenomena* (trad. de E. Doland y C. Maschler), University of Chicago Press, Chicago, 1969, p. 23.

«real» a los ojos de Copérnico. Kepler se mostró aún más explícito al argüir que el acertado modelo matemático de la realidad, lejos de ser arbitrario, es el único capaz de explicar ciertos rasgos del universo, tales como el número seis para los planetas (incluyendo la Tierra).

Esta característica de la ciencia renacentista —fundirse insensiblemente con la «física matemática» (la expresión sigue siendo anacrónica, por supuesto) del siglo XVII— se ha calificado de diversas maneras: calificarla de «platonismo redivivo» pone de relieve el concepto más estático del orden matemático o la arquitectura en la naturaleza y encuentra su éxito más obvio en la cristalografía; calificarla de «pitagorismo redivivo» acentúa el concepto más dinámico de la teoría articulada matemáticamente con un matiz más esotérico (pues los pitagóricos, como recordó Copérnico, mantenían sus descubrimientos en secreto), mayor interés por cómo se producen los fenómenos, que por la composición del mundo, o, de manera más sencilla, cabe hablar con Alexandre Koyré de la «matematización» de la naturaleza. La defensa más elocuente y completa de este proceso la hizo Galileo, cuya «matematización» de la ciencia del movimiento de los cuerpos reales proporcionó un modelo para la ciencia física en general durante el siglo siguiente.

Aunque este abandono de la forma de explicación verbal por la matemática sea el principal cambio epistemológico del Renacimiento, no es, desde luego, el único, ni el único cambio intelectual que haya afectado a la ciencia. La tendencia introspectiva, respetuosa consigo misma, del pensamiento medieval se debilitó: si al hombre se le seguía viendo como el microcosmos, esto hacía que el macrocosmos, el universo, fuera más en vez de menos interesante. Si la naturaleza era aún el teatro de Dios donde se representaba el drama humano, esta sabiduría, esta bondad y esta providencia donde mejor se descubrían era en la comprensión científica y la veneración más profundas de esta maravillosa creación. Como dice Francis Bacon:

> ... todo el conocimiento y especialmente el de la filosofía natural tiende en gran medida a magnificar la gloria de Dios en su poder, su providencia y sus beneficios; aparece y está grabado en sus obras, las cuales sin este conocimiento se contemplan sólo como a través de un velo.[10]

10. F. Bacon, en J. M. Robertson, ed., *Philosophical works*, Routledge, Londres, 1905, p. 209.

Y el Renacimiento, en especial Bacon, tendió de forma creciente a recalcar un aspecto anteriormente olvidado de esta idea: todo lo que hay en la naturaleza lo había creado Dios para el uso o la instrucción del hombre, estos «mensajes» sólo debían descifrarlos, por así decirlo, aquellos que entendieran la naturaleza, y, por ende, la ciencia puede y debería mejorar la utilidad de la naturaleza para el hombre, cumpliendo así la intención providencial de Dios. ¿Acaso no había incontables secretos en la mecánica o en el tratamiento de los metales, por ejemplo, que, una vez descubiertos por los hombres, podían facilitar y enriquecer grandemente sus vidas? El campo más obvio para semejante mejora, sin que fuera previsible ningún demérito en compensación, era la medicina; el Nuevo Mundo en especial debía de estar provisto de incontables plantas de valor medicinal, pocas de ellas descubiertas ya por los indios nativos, que Dios seguramente había creado para que fueran valiosas para los europeos a quienes Él había permitido descubrir y ocupar aquellas tierras hasta entonces ocultas.

La exploración geográfica y la expansión territorial habían sido manifestaciones espectaculares, enérgicas de una Europa que de muchas maneras estaba abandonando su talante pasivo por otro activo. El temor al turco feroz duraría, en forma de legado anticuado, hasta el siglo XIX, pero la Europa cristiana se encontraba ahora en las postrimerías del XV y entrando en una fase de más de cuatro siglos de duración en la que no necesitaría temer a las presiones de grandes potencias exteriores. Carlo Cipolla ha explicado bien de qué modo Europa, gracias a su superioridad técnica en el arte de la guerra, obtuvo el dominio del comercio a escala mundial, así como el poder que permitió a un puñado de hombres someter al imperio azteca.[11] El agresivo europeo era a la vez escéptico y supersticioso, tolerante y de miras estrechas, bárbaro y culto. Una parte de él rechazaba el mundo no europeo por salvaje, absurdo o ineficaz, pero otra parte ansiaba admirar y tomar en préstamo: la porcelana primero, por ejemplo, luego la costumbre de beber té. De modo especial, al europeo le impresionaba la habilidad artística de los pueblos extraños: los trabajos con plumas de los aztecas (su oro, sin embargo, se limitaba a fundirlo en barras), las alfombras persas, las sedas y los algodones indios, pero no encontraba nada que pudiera competir con la industria sólida, práctica de su propio continente, o con su perspi-

11. Carlo Cipolla, *Guns and sails*, Collins, Londres, 1965.

cacia para los negocios, o con su ciencia. Antes de que transcurriese un siglo desde que se doblara el cabo de Buena Esperanza y desde el descubrimiento de América, el europeo empezó a verse a sí mismo como el gran inventor práctico que había adquirido poder y riqueza gracias a la combinación de sentido común, destreza manual y conocimiento natural. Filosóficamente, quien mejor presenta esta visión es Francis Bacon, escribiendo, por ejemplo, en el primer aforismo de su *Novum organum*: «El hombre, siendo el servidor e intérprete de la Naturaleza, puede hacer y comprender tanto y tanto sólo como haya observado de hecho o pensamiento del curso de la naturaleza; más allá de esto no sabe nada ni puede hacer nada». Pero, visual y simbólicamente, donde mejor se ve es en *Nova reperta* («Nuevos descubrimientos») de Jan Stradanus (*c.* 1590), serie de grabados que muestra la maestría europea en la fabricación de cañones, la imprenta, la fuerza eólica e hidráulica, la brújula y el magnetismo, la elaboración de papel, la fabricación de gafas, la pólvora, el arte de tejer seda y otros muchos oficios, ninguno conocido de los antiguos aunque gran número de ellos ya existían mucho antes del Renacimiento.[12] Aparte del interés de los griegos por el análisis matemático de las máquinas, los siglos XV y XVI fueron los primeros en los que hubo interés literario consciente por los oficios y la tecnología (arquitectura, máquinas, asuntos militares y navales, hidráulica, metalurgia y minería; de hecho, virtualmente toda la gama sin excluir la agricultura (que produjo multitud de libros impregnados por la creencia de que la innovación y el perfeccionamiento de las técnicas eran tan posibles como necesarios. De Agrícola a Zonca, los autores insistieron en que el aprovechamiento de la naturaleza por el hombre es casi tan maravilloso como la naturaleza misma.

En modo alguno todos estos expertos técnicos —a los que también podríamos llamar propagandistas— tenían fe en el saber abstracto o académico: algunos, como Bernard Palissy, el ceramista, y Paracelso, el médico y químico, se burlaban abiertamente del conocimiento basado en los libros y de su futilidad. De hecho, el incremento del progreso técnico y de la inversión de capital que llevó a Europa a las puertas de la revolución industrial en los siglos XVI y XVII lo mantuvieron hombres prácticos, ingenieros e industriales, más que los

12. Una reedición útil de estos grabados fue publicada por la Burndy Library, Norwalk, Connecticut, hacia 1950.

eruditos que (a veces) escribían los libros; los anónimos precursores de Thomas Newcomen y Abraham Darby. De aquí que los hechos reales del progreso técnico, así como la percepción contemporánea de los mismos como un ideal a que aspirar —cosas ambas que pueden exagerarse, pues todavía son invisibles en la literatura de imaginación, por ejemplo—, mantengan una relación enigmática con la ciencia. Durante el siglo XVII, siguiendo a Bacon, la utilidad de la ciencia para los aspectos prácticos de la vida humana se convertiría en un tópico propagandístico, pero los beneficios eran siempre futuros más que actuales. Antes de 1660, de todos modos, los beneficios directos que cabía enumerar como frutos del renacer científico eran escasos y dudosos; pues de los avances médicos, por poner un ejemplo favorito, innovaciones como las gafas, batir la catarata o abrir a causa de un cálculo parecen surgir tanto de la osadía y la destreza manuales como de la teoría, y otras, vistas desde nuestra perspectiva, parecen tal vez más poderosas por su acción sobre las excreciones naturales del cuerpo que por curar verdaderamente las enfermedades. Y allí donde el empuje del cambio científico parece más vigoroso quienes lo llevaron a cabo parecen (en la medida en que ahora podemos observarlo) no haberse preocupado mucho por las posibles aplicaciones a la artesanía o la industria. Se advierte más a menudo el deseo de resolver viejos problemas intelectuales que el deseo de resolver nuevos problemas técnicos. La mentalidad renacentista no creía necesario adquirir conocimientos *nuevos* para ejercer mayor control sobre la naturaleza; a decir verdad, en la magia, que tanto las gentes cultas como las sencillas consideraban todavía como la clave más obvia para alcanzar tal control, lo único que se pretendía era emular el poder conseguido por los magos de la antigüedad. De manera análoga, muchos matemáticos y filósofos naturales, sin excluir a Newton, creían estar recuperando una sabiduría que había permanecido extraviada durante mucho tiempo, más que descubriendo algo fundamentalmente nuevo. Hasta en un caso aparentemente tan sencillo como el de Francis Bacon es, por lo tanto, anacrónico (como ha señalado Paolo Rossi)[13] detectar un hilo del pensamiento tan ingenuo como éste: la investigación trae conocimientos nuevos, los conocimientos nuevos engendran nueva tecnología. Aún no se había expresado el concepto de que el aparato técnico de la sociedad era capaz

13. Paolo Rossi, *From magic to science*, Routledge, Londres, 1968.

de adquirir por sí solo una perfección cada vez mayor. Quizá sea más prometedor considerar la fertilidad latente en los campos «mixtos» del saber que el Renacimiento comenzó a promover, no sólo en varias formas de matemáticas aplicadas, sino también en las ciencias de la tierra y el mar, la mecánica, la «química» y la «fisiología», esta última a punto de dejar de ser un mero equivalente especulativo de la anatomía.

En estas nuevas disciplinas «mixtas» la estructura teórica era débil, a la vez que el contenido empírico era fuerte aunque incoherente. Aquellos que más criticaban el antiguo saber basado en los libros eran también los que tributaban alabanzas más encendidas al saber de los agricultores, los mineros, los alfareros (personas todas ellas que conocían los productos del suelo), o de los bañeros, los herbolarios y los alquimistas (personas que conocían las propiedades curativas de las aguas minerales y de otras clases, de las plantas y de los minerales), de los sopladores de vidrio, los carpinteros y los calafates, y los metalarios (personas que conocían las propiedades de los materiales). No les importaba que este saber estuviese desorganizado y que a menudo no fuera digno de confianza, pues al menos marchaba por senderos que los hombres doctos no habían recorrido anteriormente. Historiadores modernos como Edgar Zilsel [14] y Cyril Smith [15] han argüido que algunos campos nuevos para la investigación, como el geomagnetismo y la metalurgia (aunque estas etiquetas sean anacrónicas), surgieron casi enteramente de raíces como éstas; Francis Bacon había dicho más o menos lo mismo y dos generaciones después Robert Boyle señalaría lo que el filósofo de la naturaleza podía aprender del artesano. Parece cierto que esta actitud más ecléctica y menos desdeñosa ante lo que podía considerarse como conocimiento del mundo natural surtió un efecto considerable en la historia natural y estimuló el interés por sus curiosidades (cuevas, minerales extraños, monstruos y prodigios) y, como en la historia de la neumática que comentaremos más adelante, a veces brindaba nuevas ramas de investigación sistemática. No es que esto sucediese por vez primera, ya que en la zoología de Aristóteles había mucha información obte-

14. Artículos aparecidos en *Journal of the History of Ideas*, 1940, reeditados en P. P. Wiener y A. Noland, eds., *Roots of scientific thought*, Basic Books, Nueva York, 1957, pp. 219-280.

15. C. S. Smith, *The pirotechnia of Vanoccio Biringuccio*, Basic Books, Nueva York, 1958, introducción.

nida de pescadores, ganaderos, apicultores, etcétera, y Ctesibio (el antiguo fundador de la neumática) era hijo de un barbero de Alejandría. Sin embargo, es dudoso que este refrescante soplo de empirismo fuera la causa directa y única de la introducción de la experimentación sistemática en la ciencia: más bien parece que la observación y la experimentación conscientes y controladas se emplearon por vez primera en las ciencias tradicionales (la astronomía, la óptica, la anatomía-fisiología), aunque puede que la química presente un caso bastante distinto. Si pensamos en los primeros experimentos clásicos en el campo de la mecánica (sobre la caída de los cuerpos, los péndulos, el choque), por ejemplo, no parecen relacionados muy estrechamente con las máquinas, aunque, por otra parte, hay que tener presente que el péndulo sí hace su primera aparición en máquinas diseñadas por Leonardo, como dispositivo inercial para el almacenamiento de energía.

Por lo menos en la perspectiva más amplia de la historia, probablemente es inútil tratar de ser demasiado definido en lo que se refiere a la influencia del progreso técnico —que en sí mismo está por encima de toda duda— en la modificación de los ideales y métodos «científicos». Desde luego, la destreza artesanal ensanchó los horizontes de la filosofía; suponer que la ciencia moderna es una amalgamación de destreza artesanal y filosofía equivale a proponer una fórmula demasiado simple y olvidar aquellos aspectos muy importantes —de hecho, preponderantes— de la revolución científica que no tenían nada que ver con la experiencia artesanal. Pero conviene tener en cuenta una dicotomía de dicha revolución que Thomas Kuhn ha señalado:[16] entre las ciencias cuantitativas o matemáticas y las ciencias cualitativas o experimentales. Si examinamos todo el campo del conocimiento natural en tiempos de Newton —e incluso un siglo más tarde, en tiempos de Laplace, la situación era muy parecida—, veremos que no había ninguna definición rigurosa en términos de metodología, epistemología, ideales o cualquier tipo de generalización, que pudiera aplicarse uniformemente a todo el campo: las ramas más precisas de la ciencia, como la astronomía y la mecánica, eran muy distintas en especie de la química o la geología. Sin ser maliciosamente *whig*, es inevitable pensar que la ciencia de Newton se acerca a nuestro propio

16. T. S. Kuhn, *The essential tension*, University of Chicago Press, Chicago, 1977, pp. 31-65.

concepto de la ciencia más que la ciencia de Boyle o, *a fortiori*, de John Woodward. Y no se trata de una cuestión de genio personal o de inventiva metodológica: nadie hubiera podido escribir una obra como *Mathematical principles of geology* en 1700. Surge, pues, esta paradoja: las ciencias que eran más rigurosas en su recurso a los hechos, y más precisas en su articulación teórica, eran las mismas que ya poseían estas características en la antigüedad y en la Edad Media; incluso la mecánica, la más profundamente revolucionaria de todas las formas de conocimiento natural, tenía largos y respetables antecedentes. Por otra parte, los temas de investigación creados o resucitados por el Renacimiento (la química, las ciencias de la tierra, la mayor parte de la biología) seguían siendo primitivos a finales del siglo XVII, desde el punto de vista de la estructura, a pesar de avances relativamente muy grandes. Algunos factores críticos seguían siendo inciertos, dos o más teorías rivales se disputaban la lealtad de los eruditos y abundaban las contradicciones. La «síntesis newtoniana» de la química no se efectuaría hasta alrededor de 1800; la de la geología, hasta alrededor de 1830; y la de la biología, hasta alrededor de 1860. (Por supuesto, ninguna de estas síntesis era matemática por su forma ni por su argumento.) Dicho de otro modo, las ciencias que eran más originales por su carácter en el Renacimiento, de las que más se jactaban los propagandistas contemporáneos y que más notables eran por sus fuertes elementos «mixtos» procedentes de los oficios, más baconianas, como suele decirse, en un sentido fueron las últimas en hacer su crítica transición al modernismo, siguiendo el camino marcado por las ciencias matemáticas o académicas (y, después de Newton, emulándolas conscientemente).

¿Cómo hay que entender la paradoja de que lo tradicional fuera en cierto sentido más revolucionario? Puede parecer trivial que una ciencia arraigada, como la astronomía, por ejemplo, avanzara más rápidamente que la geología: poseía técnicas, expertos asalariados en las universidades y el patrocinio del estado (por ser útil para la navegación). Lo único que podemos decir es que esto no es lo que esperaban la mayoría de los reformadores intelectuales del Renacimiento. (Descartes es una excepción: pero él era un matemático dotado para quien poco contaban el empirismo y la historia natural.) Ciertamente, no era lo que esperaba Francis Bacon: él no buscaba ninguna revolución intelectual en los campos de la astronomía y la mecánica; si Bacon no se percató de lo que estaba sucediendo a su alrededor (en los

escritos de Galileo y Kepler, o la presencia más próxima de William Gilbert y Thomas Harriot), no fue debido a la ceguera, sino al preconvencimiento de que los verdaderos polos de crecimiento del saber científico se encontraban fuera del campo general de las matemáticas, precisamente *porque* dicho campo había sido cultivado durante mucho tiempo hasta alcanzar un punto muerto y estéril. Por decirlo de otro modo, Bacon precisamente *no* previó que el mapa del camino que llevaba a la comprensión de la naturaleza lo trazaría algún «Newton» del futuro, mientras que la generalidad de los historiadores, al mirar hacia atrás, han visto precisamente esto. A partir del siglo XVIII, el newtonianismo (en el sentido más ampio) ha sido considerado como el ideal de la ciencia; por consiguiente, el supremo triunfo de la revolución científica es la consecución de la visión newtoniana del mundo, con la cual, en siglos posteriores, también se hicieron consistentes las ciencias empíricas.

Actualmente esta historiografía impone menos respeto universal que hace treinta años. Hay quienes piensan que la ciencia natural podría o debería haber seguido otra visión del mundo. Les consuela un poco el hecho de que la visión newtoniana resultara demasiado simple. Puede que hablen de indeterminación. Este debate no viene al caso ahora, pues he escrito el presente libro con el convencimiento de que el newtonianismo sí proporcionó el camino histórico hacia el desarrollo de las ciencias que realmente tenemos. Y está claro que, si bien lo que se ha dado en llamar «baconismo» —lo que aquí he llamado el cultivo empírico de las ciencias «mixtas»— hizo aportaciones importantes a la ciencia moderna, no anduvo por el citado camino. Si Galileo, Descartes, Newton (y otros) nunca hubieron oído el nombre de Bacon, la historia se habría visto poco afectada, antes de 1700. Y con esto no pretendo en modo alguno negar la importancia crucial de la reconciliación última, en el siglo XIX, del baconismo y el newtonianismo.

Todo esto depende no sólo de la naturaleza de los materiales a los que deben enfrentarse las diversas ciencias, sino también de la naturaleza de la mente humana que debe hacer frente a estos materiales. Lo que está en juego no es únicamente el problema: ¿son las estrellas más fáciles de entender que las rocas o sucede al contrario? Cuando deja de ser meramente descriptiva, toda la ciencia es básicamente un estudio del movimiento y el cambio, ya se le llame «evolución biológica» o «la expansión del universo». Ocurre que el movi-

miento es algo que la mente occidental (al menos) ha encontrado comprensible, en parte gracias a la posibilidad de asociarlo con el número, y, por ende, el éxito con todas sus manifestaciones es la naturaleza misma de la evolución científica. Ahora bien, el movimiento macroscópico —los movimientos fácilmente discernibles de las cosas grandes— es relativamente fácil de estudiar, al menos hasta que las velocidades se aproximan a la de la luz, y las cosas son tan grandes como las galaxias: esto ha formado la tradición principal de la ciencia física, desde Aristóteles hasta Einstein pasando por Newton. Pero el movimiento microscópico —los movimientos normalmente indetectables en la estructura de las cosas que forman la base de la ciencia de toda la substancia viva e inerte— es casi imposible de desarrollar de algún modo, pero en especial matemáticamente. Aristóteles lo encontró tan imposible que lo rechazó (es decir, rechazó el atomismo) por completo; Newton vio su importancia con claridad cristalina, pero no pudo hacer ningún progreso con ello; los comienzos verdaderos fueron con la química daltoniana y la teoría cinética de los gases. Todavía se recuerdan la gran profundidad de comprensión y la posibilidad de unificación de la teoría desde la física atómica hasta la biología molecular. Cuando hablan de la tradición newtoniana y su éxito, los historiadores, por supuesto, están hablando de cinética macroscópica, pues a nivel microscópico el éxito de Newton fue sólo temporal e ilusorio. En contraste, la ciencia baconiana —en la medida en que es más que una descripción enciclopédica, y, al parecer, la visión del propio Bacon se elevaba en verdad por encima de eso— se ocupaba sólo de la cinética microscópica, la única clase de ciencia cinética que interesaba a Bacon. Como hemos comentado antes, de la cinética macroscópica no hacía el menor caso. «Baconismo», dicho de otro modo, es una etiqueta que podría aplicarse al más recalcitrante de los dos caminos científicos para el estudio del movimiento, cuyo seguimiento resultaría tan complicado y cuyos frutos (en términos de teoría matemática) resultarían tan difíciles de conseguir. Ni siquiera hoy se encuentran unidos los mundos de Bacon y Newton, o de Bohr y Einstein, aunque sí están estrechamente conciliados.

Hay quizás otra razón que explica por qué el éxito de la rama baconiana de la revolución científica fue menos rápido, una razón que, pese a ello, podría pensarse que le dio fuerza. Se trata de sus claras implicaciones sociales. «Profeta de la ciencia industrial», la

etiqueta que Farrington puso a Bacon es absurda, pues Bacon no podía tener la menor idea de la sociedad industrial ni de la industria basada en la ciencia, aunque sin duda creía que el mejoramiento de la condición humana era un objetivo benemérito y alcanzable, y medía el conocimiento de acuerdo con un criterio práctico además de estético. No sólo deploraba los errores cometidos por la filosofía durante muchos siglos, ya que habían dejado a los hombres en estado de ceguera intelectual (no habían sabido producir *luz*), sino que los detestaba por no haber aliviado el dolor y la miseria (no habían dado *fruto*). En la denuncia baconiana de la esterilidad intelectual hay una pasión que no se encuentra, pongamos por caso, en la descripción por Descartes de la ignorancia real de aquellos a los que se suponía cultos. La revolución filosófica que Bacon desea provocar no es sólo de ideas y métodos, sino que pretende alterar todo el rumbo de la historia humana, que ya en la antigüedad había comenzado a desviarse, de tal modo que el potencial del hombre nunca se había realizado plenamente, y que en la Edad Media había retrocedido más y más. Es como si Bacon les dijera a los filósofos: «Arrepentiros: cambiad vuestra forma de proceder antes de que sea demasiado tarde», del mismo modo que los teólogos puritanos harían el mismo llamamiento al pueblo, pensando en el apocalipsis que se avecinaba, y, a decir verdad, del mismo modo que Savonarola, en el decenio de 1490, había instado a los florentinos a arrepentirse, exclamando: «La Espada ha descendido; el azote ha caído; las profecías se están cumpliendo... No soy yo sino Dios quien lo predijo. Ahora ya viene. ¡Ha venido! ».[17] Muchos puritanos ingleses del siglo XVII creían que el Milenio pronosticado en el Nuevo Testamento realmente había empezado con la Reforma protestante, y que ellos estaban viviendo en la era del «Reino que jamás será destruido», la última era de los hombres sobre la Tierra, en la cual, una vez ganada la guerra entre Cristo y el Anticristo, los hombres disfrutarían del dominio de la Tierra y el mar y las estrellas, aceptando la rendición de la Madre Naturaleza. El paralelo con la revolución filosófica de Bacon era natural y atractivo; como dice Charles Webster,[18]

17. C. Hibbert, *The rise and fall of the house of Medici*, Lane, Londres, 1974, p. 185.
18. C. Webster, *The great instauration*, Duckworth, Londres, 1975, p. 1.

> a los protestantes [ingleses] del siglo XVII la búsqueda de una nueva filosofía basada en la experiencia les parecía del todo consecuente con la reforma religiosa. La invención de la imprenta y de la pólvora, y especialmente los viajes de los descubridores, parecían anunciar un renacimiento del saber que concordaba por completo con el previsto paraíso utópico y que, a decir verdad, era capaz de aportar el medio que permitiría convertir las condiciones utópicas en realidades.

Algunas consecuencias de esta identificación de lo filosófico con el milenio religioso aparecerán más adelante; lo que importa de momento es que, si bien dio un empuje temporal y local a ciertos fenómenos intelectuales en Inglaterra, redujo el atractivo del baconismo para aquellos que tenían otras creencias religiosas y una perspectiva filosófica distinta. En Europa las consideraciones metafísicas de Descartes o de Leibniz parecían mucho más pertinentes, como substrato de una visión científica del mundo, que cualquier variedad de milenarismo o utopismo, de manera que, a pesar de las discrepancias inmensas entre Descartes y Leibniz (que eran pensadores muy desemejantes) por un lado y Newton por el otro, tenían más en común unos con otros (a todos les interesaba la cinética macroscópica) que con Bacon. Asimismo, la perspectiva puritana y milenaria gozaría sólo de una breve dominación y su caída arrastraría consigo a gran parte de la fuerza del baconismo.

En el análisis sencillo vemos que la filosofía de Bacon y sus ideales se entrelazaron con un activismo social que, de hecho, no era contrario al espíritu del propio Bacon, aunque éste no era puritano en teología ni en su visión de la historia. Puede que un compromiso como éste dé fuerza a determinada corriente de la ciencia durante un tiempo, pero, al cambiar la sociedad, se convierte en un grillete. La ciencia matemática o «newtoniana», libre de compromiso social, capaz de cualquier tipo de camaleonismo que le permitiera florecer en Londres, París, Berlín o San Petersburgo, era universal. A pesar de su brillante comienzo, el baconismo y la ciencia descriptiva dejaron (en la mente de la mayoría de las personas) sólo el tenue legado del empirismo, *fiat experimentum*, y la anécdota según la cual Francis Bacon murió de un resfriado por rellenar una gallina de nieve. En el continente, la historia natural enciclopédica tuvo que empezar de nuevo con la obra de Buffon y de Alexander von Humboldt; la cinética microscópica, igualmente en el continente, nacería de raíces tan

diversas como las estadísticas matemáticas, la química de Lavoisier y los experimentos de hibridación con plantas que realizó Koelreuter, todo ello en el siglo XVIII, y preparando el camino para una «segunda revolución científica» en el siglo XIX gracias a la cual por fin estuvo al alcance de la mano la antiquísima visión de armonía entre los mundos microscópico y macroscópico.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA DE LA CAUSA

Ni la mutación ni la fijeza son inevitables en los asuntos humanos, incluyendo la filosofía y la ciencia. Las ideas, al igual que las sociedades, a veces han cambiado rápidamente, a veces han dado la impresión de permanecer en el mismo estado durante muchos siglos sucesivos. Es, pues, una paradoja de la historiografía que una de las dos, no importa cuál, pueda parecer que requiere explicación, como si la otra no la requiriese. Así, podríamos tratar de explicar por qué las instituciones políticas inglesas, aunque en muchos aspectos son obviamente imperfectas, permanecieron invariables de 1689 a 1832, al mismo tiempo que, a la inversa, intentábamos explicar la gran convulsión política que ocurrió en Francia en 1789. Esto se debe en parte a que el historiador, ante un acontecimiento dado, puede preguntarse por qué ocurre ahora en vez de antes o después, o por qué ocurre aquí en lugar de allí, de manera que el problema de por qué ocurre un acontecimiento dado puede ser sencillamente lo inverso del problema de por qué no ocurre dicho acontecimiento.

A menos que se acepte la inevitabilidad de los acontecimientos históricos [1] —y, si se acepta, desaparece la necesidad de explicación—, la revolución científica de los comienzos de la era moderna no tenía por qué haber ocurrido. Verboso y general como era, el sistema de filosofía, ciencia y medicina que se había formado por selección (a veces caprichosa) partiendo de la vida intelectual del mundo antiguo y que durante tanto tiempo había satisfecho a las sociedades

1. La refutación clásica está en Isaiah Berlin, *Historical inevitability*, Oxford U. P., Oxford, 1954.

sucesoras, tanto islámicas como cristianas, tal vez hubiese durado aún más. Quizá sutilmente modificado, como lo había sido en siglos anteriores, pero conservando todavía su homogeneidad esencial y su fuente de interés profundo (aunque erróneo) para la conciencia humana, hubiese durado milenios. Ese sistema sigue atrayendo el interés profundo de eruditos especializados, aun cuando se niegue su validez; ninguna mente sensible lo descartaría, tachándolo de tonterías anticuadas, al mismo tiempo que partes de él siguen siendo válidas para los miembros menos cultos de las sociedades occidentales. Aunque ahora sabemos que la visión científica premoderna del mundo es falsa, no era ni es despreciable desde el punto de vista intelectual y, de hecho, se la puede considerar satisfactoria y adecuada para muchos fines. No podemos decir que «forzosamente» tenía que quedar desacreditada.

Así, pues, tuvo que haber motivos especiales para su fracaso, al que, a decir verdad, se opuso fuerte resistencia por razones no del todo absurdas o convencionales. A veces parece que el triunfo de las revoluciones políticas se debe a que las fuerzas del conservadurismo han perdido convencimiento y, por ende, el valor para defenderse: los defensores de la ciencia establecida en los siglos XVI y XVII no habían perdido ninguna de las dos cosas, ni eran estúpidos, y, por supuesto, disponían del poder de las clases directoras. En consecuencia, no deberíamos hacer una sola pregunta, sino dos: ¿por qué llegaron a introducirse ideas y métodos científicos nuevos (o, para ser más exactos, por qué *algunos* prevalecieron, *al menos durante un tiempo*)? Y siempre debemos recordar que la revolución científica fue un proceso episódico —no tenemos motivos para creer que los puntos de vista de Copérnico sobre la medicina no fueran convencionales. Filósofos como Bacon y Descartes lanzaron amplios ataques metodológicos contra el pasado, pero los investigadores prácticos de los fenómenos tendían a emplear métodos poco sistemáticos (tal es el caso, por ejemplo, del estudio de la luz que llevó a cabo el propio Descartes).

Las causas de la revolución científica que señalan los historiadores se dividen en dos clases claramente definidas: algunas están relacionadas con el grado de desajuste entre el saber establecido y la sociedad del Renacimiento y, por consiguiente, hacen que un cambio en la sociedad preceda a un cambio en la ciencia. Otras causas tienen que ver con la consistencia intelectual de la ciencia, ya sea dentro

de sí misma o en relación con otras actividades intelectuales como la religión y la filosofía: nos referimos de modo muy general a una «visión del mundo» que contiene muchos elementos además del científico; si estos elementos sufren alguna alteración, también deben cambiar las partes científicas del conjunto. Obviamente, estas dos clases de causas, prescindiendo de la plausibilidad de los comentarios que se hagan sobre ellas, son complementarias más que antagónicas: si así lo deseáramos, podríamos buscar el origen de las ideas científicas nuevas en los cambios de perspectiva intelectual, buscando al mismo tiempo su aceptabilidad en los cambios de la sociedad. Es igualmente obvio que el cambio intelectual está relacionado con los individuos —en primer lugar, alguien, o un grupo reducido, debe proponer una idea nueva o un método nuevo—, mientras que los comentarios de los cambios sociales están relacionados en principio con grandes grupos de personas, tales como la mayoría de los puritanos ingleses, o los especuladores en las exploraciones ultramarinas o los médicos en ejercicio. Escribo *en principio* porque, en la historia intelectual, donde se invoca a la «sociedad» no suele haber en la práctica ningún empleo de muestras estadísticamente significativas, excepto allí donde se utilicen las técnicas de la prosopología; generalmente, el debate gira en torno al examen de unos cuantos individuos supuestamente típicos. Un tercer punto obvio es que el análisis intelectual es vulnerable debido a la particularidad (si estudiamos con la mayor atención posible el funcionamiento de la mente de un solo individuo, sea éste Galileo o Newton, no averiguaremos nada sobre los pensamientos que ocupan otros cerebros), mientras que el análisis social es vulnerable no sólo técnicamente (debido a la escasez de datos), sino a causa de la lógica imposibilidad de hacer que, por ejemplo, la percepción de un problema sea lo mismo que la solución del mismo. Porque, desde luego, abordar problemas nuevos es sólo un aspecto de la evolución de las ideas; la aportación de soluciones nuevas a problemas viejos tiene cuando menos igual importancia, tal vez más, y pocos problemas tienen soluciones únicas.

Empezando por el análisis social, que al menos promete generalidad en vez de gran número de casos individuales, es claro que desde hace mucho tiempo los historiadores han examinado multitud de cambios que denotan la transición del mundo «medieval» al «moderno», cambios que pueden simbolizarse geográficamente por el descubrimiento de América en 1492, políticamente por la penetración

de los franceses en Italia en 1494, y en religión por la exposición de las tesis de Lutero en 1517. Si hubo en verdad un punto decisivo en el carácter de la civilización occidental —que nunca se caracterizó por su estabilidad a largo plazo—, entonces no es irrazonable suponer que existe una conexión entre formas más flexibles de pensamiento y formas más flexibles de sociedad. Los historiadores han escrito acerca del estímulo que se obtiene de la exploración a escala mundial y del descubrimiento de la fauna y la flora de los continentes desconocidos: la primera, al depender la navegación de la cartografía y la astronomía, garantizaba la importancia de las matemáticas aplicadas que cultivaban numerosos «ejercitadores matemáticos» en los puertos de mar y otros centros importantes y que fueron el origen de las primeras escuelas profesionales para la formación de oficiales navales;[2] la segunda, debido a la curiosidad, al prestigio que daban las colecciones de animales exóticos y a la importancia medicinal que se concedía universalmente a las hierbas, revigorizó la historia natural e inició el interés por la antropología.[3] En ambos casos el factor principal fue el ensanchamiento y la materalización de intereses: una preocupación, surgida casi de la necesidad, por cosas reales como la hora de salida de las estrellas o los animales desconocidos, pero sin ninguna tensión entre esta preocupación nueva por una realidad también nueva y la antigua estructura de la astronomía y la filosofía. Si el mayor conocimiento de la naturaleza y la agudización de las necesidades matemáticas despertaron algún escepticismo con respecto a las antiguas categorías del pensamiento, a lo sumo sería indirectamente, al convertirse el profesionalismo académico en profesionalismo práctico.

Una conclusión muy parecida es aplicable a otro agente, muy traído y llevado, del fermento intelectual: la tecnología. El papel puramente indirecto de la imprenta (1454), por ejemplo, es sin duda indiscutible: la imprenta no incitó a la gente a escribir libros nuevos o a poner ideas nuevas en ellos más de lo que la incitaron los *scriptoria* organizados que habían existido durante siglos. Lo que hizo la

2. Para Inglaterra, véanse los numerosos escritos de Eva G. R. Taylor, a partir de *Tudor geography* (Methuen, Londres, 1930); para Francia, la obra de F. B. Artz. También F. R. Johnson, *Astronomical thought in Renaissance England*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1937.

3. W. T. Stearn, *Botanical gardens and botanical literature in the 18th century*, Hunt Foundation, Pennsylvania, 1961.

imprenta fue ampliar inmensamente el número de lectores: fue la multitud de ejemplares de los libros, no su método de producción *per se*, lo que llevó poco a poco a la ampliación de la naturaleza del libro, mediante la escritura de manuales para el autodidacto y libros especializados para personas que antes, si es que sabían leer, ciertamente no compraban libros. Entrelazado con esto se halla la ascensión del profesionalismo matemático práctico, en tierra además de en el mar (agrimensores, ingenieros de desecación, arquitectos, constructores de buques, artilleros), que prosperaban en una Europa belicosa y económicamente emprendedora. La matematización, pese a ser rudimentaria, de estas artes antiguas (que en el Renacimiento cambiaron de forma más que de esencia) expresó en sí misma una actitud nueva que creaba un decidido efecto de retroacción entre la *idea* de lo que debería ser tal ejercitador y la *manera* en que realmente hacía su trabajo, donde el libro impreso interpreta un papel germinativo de refuerzo. Por otra parte, el principal interés que tiene esto para el historiador de la revolución científica estriba en que creó una población nueva que era a la vez «culta» y práctica, aunque no oficialmente académica, una población capaz de encauzar el conocimiento de los fenómenos naturales hacia niveles intelectuales eficaces, por ejemplo. Entre las cartas de Torricelli se encuentra una queja porque las tablas de balística que había publicado no estaban confirmadas mediante pruebas prácticas (a lo cual el matemático replicó que él escribía para filósofos y no para artilleros);[4] un ejemplo más célebre es el de Galileo al enterarse de que las bombas de succión no podían elevar agua a más de unos nueve metros. En el campo general de la ingeniería encontramos matemáticos, de Simon Stevin en el siglo XVI a Leonhard Euler dos siglos más tarde, que hacen numerosas sugerencias prácticas, a las que este mundo de ejercitadores instruidos podía responder adoptando algunas y rechazando otras: al menos hasta cierto punto, la introducción de una máquina de vapor capaz de funcionar cabe considerarla como un ejemplo de este proceso, que era lucrativo tanto comercial como filosóficamente.

Ningún historiador desearía pasar por alto la importancia del factor numérico: ninguna actividad intelectual puede prosperar si los que se dedican a ella son poquísimos, están aislados y no cuentan con

4. A. R. Hall, *Ballistics in the seventeenth century*, Cambridge U. P., Cambridge, 1952, pp. 97-98.

apoyo ajeno. Ciertamente, los cambios políticos, sociales y económicos del Renacimiento hicieron que aumentase el número de personas que sabían leer y escribir (y, en menor medida, contar) hasta alcanzar cifras insólitas y estas personas se sintieron empujadas hacia la investigación de los fenómenos naturales. También cabría esperar que este interés tendiera a ser más «real» y menos esquemático o discursivo que durante la alta Edad Media. Al hacer este comentario, sin embargo, de nuevo hace falta poner de relieve que la novedad u originalidad no era muy buscada: los libros impresos que mayor éxito tuvieron en el siglo XV (dejando aparte almanaques, tratados sobre la salud y otros libros médicos) fueron enciclopedias medievales como *De proprietatibus rerum*, *c.* 1230 (Sobre las propiedades de las cosas), de Bartolomé el Inglés, o *Myrrour of the world* (1481), de Caxton, o los viajes, en gran parte imaginarios, de «John de Mandeville». En el caso de la astronomía, el libro más vendido de todos los tiempos (hablando relativamente) bien podría ser *La esfera* de Sacrobosco (*c.* 1230). Difícilmente puede el historiador exagerar el conservadurismo del sustrato de la cultura, sobre todo en el norte (lo cual explica la visión del mundo de Shakespeare).

En un sentido débil, la proposición marxista según la cual el desarrollo del comercio y de la industria en el Renacimiento, y quizás especialmente su extensión mundial, estimuló cierta clase de actividad intelectual en Europa pueda tomarse como válida, aunque insuficiente para explicar acontecimientos específicos (tales como la revolución copernicana en astronomía), mientras que la forma fuerte de la misma proposición —que el comercio y la industria dictaron problemas para que los filósofos de la naturaleza los resolvieran— parece (al menos me lo parece a mí) palpablemente falsa, pues los problemas científicos más interesantes de la época tendían aún a ser tradicionales: la anatomía humana, el movimiento planetario, la caída de los graves, etcétera. No hay que dejarse engañar por el vulgar sofisma que en los estudios de artillería de Leonardo da Vinci o las lecciones de fortificación de Galileo pretende ver la prueba de que la «ciencia» había sido atrapada por las nuevas necesidades militares.

La vinculación entre la ciencia y la tecnología por un lado y la religión por el otro la señaló Robert K. Merton, hace casi medio siglo, en su clásica historia de la sociología de la ciencia:[5] la idea

5. Robert K. Merton, *Science, technology and society in seventeenth century England*, Osiris, 1938, reedición Harper, Nueva York, 1970.

de que la religión reformada (en especial sus sectas calvinistas) favorecía el cultivo de la ciencia natural de un modo como no lo hacía la iglesia católica —como no lo hacía, de hecho, ninguna iglesia con obispos— se remonta, por supuesto, a mucho más de medio siglo atrás y sigue atrayendo a autores capacitados como Christopher Hill, Reijer Hooykaas y Charles Webster.[6] Parece que los historiadores de la Europa católica y mediterránea no la adoptaron. A primera vista, la correlación tiene muchos méritos: al parecer, la mitad norte y protestante de Europa tuvo más suerte, en lo que se refiere a hacer importantes descubrimientos científicos, que la mitad sur, y en países como Italia y España los logros científicos no precedieron, sino que siguieron a la relajación de la influencia clerical en los asuntos docentes e intelectuales. Nadie podría negar la categoría de la investigación en la católica Francia, pero es notorio que en ese país los intelectuales, especialmente los ilustrados del siglo XVIII, fueron en su mayor parte anticlericales. Por otra parte, los argumentos de Merton y otros no dependían sólo de la acumulación de ejemplos (donde la ponderación es tan importante como imposible) sino también de una argumentación detallada sobre el valor de la ética del trabajo en la perspectiva protestante, la creencia en la salvación a través de las obras y la necesidad de alabar a Dios con conocimiento de causa: de este modo se ofrecía una explicación coherente de *por qué* el calvinista o el puritano en particular era más inclinado a estudiar la naturaleza que su contemporáneo católico, más alegre u oscurantista. Así, Merton escribió:[7]

> El puritanismo infundió vigor ascético a actividades que por derecho propio aún no podían alcanzar la autosuficiencia. Redefinió las relaciones entre lo divino y lo mundano de tal modo que llevó a la ciencia a la *primera fila de los valores sociales*. Dio la casualidad de que esto se hizo a expensas de los intereses literarios *y, al final, de los religiosos* ... El puritanismo se diferenciaba del catolicismo, que poco a poco había llegado a tolerar a la ciencia, en que exigía su cultivo en vez de limitarse a condenarlo.

6. Christopher Hill, *Intellectual origins of the English Revolution*, Clarendon Press, Oxford, 1965 (hay trad. cast.: *Los orígenes intelectuales de la Revolución inglesa*, Crítica, Barcelona, 1980); Charles Webster, *The great instauration*, Duckworth, Londres, 1975.
7. Merton, *op. cit.*, pp. 86-87.

Por sorprendentes que estas expresiones fuertes (a las que yo he añadido énfasis) parezcan a quienes tengan otras opiniones de las enseñanzas principales de Juan Calvino y John Knox, no han sido repudiadas (que yo sepa) por los recientes defensores de la «ética protestante» en relación con la ciencia, los cuales, de hecho, citan principalmente a autores del siglo XVII y a veces, incluso, a hombres que llegaron a ser obispos. Pero en todo caso, es imposible extrapolar la tesis de la «ética protestante» al siglo XV, ni nadie la ha apoyado aludiendo a las célebres tesis de Wittenberg que Lutero expuso en 1517. La dominación de Ginebra por Calvino empezó en 1541, pero su obra *Instituciones de la religión cristiana* no quedó terminada hasta 1559. Para entonces, a juicio de la mayoría de los historiadores intelectuales, la historia del pensamiento de Europa seguía un rumbo nuevo desde hacía mucho tiempo. Las grandes obras de Copérnico y Vesalio ya habían sido publicadas (1543) y el primero ya había muerto. Tartaglia, Paracelso, Fernel y otros muchos pioneros del nuevo movimiento científico también habían muerto antes de 1559. Sería verdaderamente extraño decir que el despertar del espíritu europeo había sido obra de Calvino, que condenó a Servet a morir en la hoguera en Ginebra (1544). Además, era a Italia y a ninguna otra parte adonde deseaban viajar los intelectuales del siglo XVI, incluyendo, mucho más adelante, el archipuritano Milton. Italia formó a Copérnico y permitió a Vesalio (otro hombre del norte) realizar su labor. La nueva botánica, la nueva álgebra, la nueva anatomía procedían de Italia, cuyas universidades atraían a los estudiantes más distinguidos de todos los países prescindiendo de su secta. El telescopio y el microscopio eran italianos, como antes lo habían sido las gafas; la neumática era italiana; los ingenieros mejor pagados eran italianos.

El protestantismo no tiene absolutamente nada que ver con el comienzo de la revolución científica. Otra cosa es su influencia en el carácter de la ciencia del siglo XVII. Pero a ningún historiador (creo yo) se le ha escapado la continuidad esencial que existe de Vesalio a Harvey, de Copérnico a Kepler, de Galileo a Newton, y que tiende firmemente un puente sobre cualquier extensión de tiempo en la que cabría suponer que se infiltrara el nuevo espíritu protestante. Los historiadores que deseen escribir alguna crónica genética de la revolución científica, o seguir la evolución de la misma desde sus modestos comienzos a través de sucesivos avances y modificaciones, sin duda harán bien en dirigir la mirada hacia el universalmente católico

siglo XV, cuando Leonardo y Copérnico eran jóvenes, en busca de los primeros portentos de lo que vendría después.

Decir esto no es negar la existencia de otros problemas históricos. Al preguntarnos por qué el Mediterráneo no retuvo, después del siglo XVI, la influencia científica y tecnológica que tan grande había sido durante el Renacimiento, por qué hombres del norte como Descartes, Huygens y Newton dominan el panorama, la reacción clerical contra la nueva filosofía se nos presenta como explicación obvia. La tradición galileana, condenada por su iglesia, murió en Florencia;[8] los hombres de la siguiente generación que, como Borelli y Malpighi, continuaron dando distinción intelectual a Italia en modo alguno fueron universalmente alabados allí, ni se vieron libres de obstrucciones. Por lo tanto, es muy posible que las distinciones sectarias tuvieran mucho que ver con la continuación de la revolución científica —aunque incluso en el norte protestante había reaccionarios, como sir William Temple y el doctor Jonathan Swift, y se hacían críticas clericales del materialismo de la nueva ciencia—, pero la simple asociación de protestantismo y ciencia, catolicismo y no ciencia, es claramente insostenible.

La investigación de las afiliaciones de aquellos que actuaron enérgicamente a favor de la innovación intelectual o en contra de ella ha resultado difícil e inconcluyente, y hay discrepancias sobre cómo debe llevarse a cabo para obtener resultados esclarecedores. En los bordes del movimiento científico cabía encontrar personas de casi todas las clases, hasta el nivel de escribanos, comerciantes y boticarios. Los principales centros de actividad eran, como es natural, las universidades y las grandes ciudades (algunas de las cuales, como Londres, Venecia y Lyon, no tenían universidad), pero había unos cuantos *curiosos* o *virtuosi* (como solía llamárseles en el siglo XVII) en las ciudades de provincias e incluso en lo más remoto del campo. En algunas ciudades como la de Caen en Normandía o la de Spalding en Lincolnshire florecieron sociedades locales. Estos grupos e individuos aislados (el viejo John Beale en Somerset, Martin Lister en York), que raramente podían asistir a las reuniones de academias nacionales como la Royal Society, se mantenían en contacto por medio de los sistemas postales nacionales, que ya eran bastante eficientes, aunque aún no existía un sistema postal *internacional*; también

8. M. Torrini, *Dopo Galileo*, Olschki, Florencia, 1979.

se distribuían por correo las publicaciones periódicas que nacieron en aquel tiempo. Sin duda, la clase más nutrida de cuantas formaban el movimiento científico era la médica, en todos los países; algunos médicos ocupaban puestos académicos y había otros académicos —profesores de matemáticas, por ejemplo— que promovían ardientemente sus respectivas disciplinas. También las iglesias daban en todas partes hombres doctos a la ciencia, lo cual se debía en no poca medida (en los estados católicos) a las grandes órdenes dedicadas a la enseñanza, los jesuitas y en Francia también los oratorianos. Algunos de ellos, como los astrónomos Giambattista Riccioli en Italia y Giovanni Domenico Cassini en Francia, ya fuera por necesidad o por convencimiento sincero, siguieron siendo anticopernicanos, al mismo tiempo que, sin embargo, llevaban a cabo labor profesional de la mayor importancia. (Un número muy reducido de astrónomos, incluyendo a Cassini y a John Flamsteed en Greenwich, fueron los únicos hombres del siglo XVII contratados específicamente para investigar.) La mayor parte del clero científico, y todos los miembros de la nobleza que participaban activa o pasivamente en el desarrollo de las matemáticas y la ciencia eran, desde luego, estrictamente «aficionados», aunque hablar de científicos profesionales antes del siglo XIX es sumamente inapropiado, toda vez que sugiere una similitud con el presente que en realidad no existía. En el siglo XVII no había, como hay ahora, sanciones para los «profesionales» que no justificaban su promesa de investigación y publicación.

En todo caso, aunque las investigaciones prosopológicas de los siglos XVI y XVII fueran dignas de confianza o convincentes, seguiríamos sin saber si para el avance de la ciencia cuenta más la polémica ruidosa o la sólida labor profesional, o si tiene sentido comparar los logros de Francis Bacon, escritor programático de la Inglaterra protestante, con la microscopia descriptiva de Marcello Malpighi en la católica Italia, dos generaciones más tarde. Igualmente incomparables, en el caso de un individuo único como Galileo, son los efectos de los descubrimientos científicos y los escritos polémicos. Es demasiado ingenuo, históricamente, preguntar cuál era la postura de los hombres ante alguna cuestión importante, ya fuera de doctrina religiosa o científica, como si existiesen formas sencillas de comprobar si tal o cual individuo era «reaccionario» o «progresista», «conservador» o «innovador». De hecho, no hay tales formas sencillas y en aquel tiempo, como en todos los tiempos, los pensamien-

tos y actitudes de las personas eran mixtos, a la vez que gran parte de la labor más importante realizada en las matemáticas y la ciencia era puramente técnica, carente de los matices y las complejidades que algunos eruditos modernos se empeñan en detectar en todas partes, como si fueran psiquiatras en busca de trascendentales experiencias infantiles.

En el plano intelectual, donde los historiadores han tratado de encontrar los orígenes de la ciencia moderna con un nuevo «gorro de pensar» (como dijo Herbert Butterfield), una idea distinta de cómo podrían afrontarse los problemas filosóficos, astronómicos o matemáticos, desde hace tiempo se acepta que el estudio de la naturaleza se deriva —de modo no específico— de los horizontes cada vez más anchos del Renacimiento del siglo XV, y especialmente del «humanismo».[9] El humanismo es un concepto mal definido y que tal vez ya no sea muy apropiado: mal definido, porque parece dar a entender una libertad respecto del fervor religioso y la intolerancia que en modo alguno iba a ser característica de la sociedad europea, y porque el interés por la humanidad (ya fuera literario, psicológico o social) en modo alguno está necesariamente vinculado a alguna clase de preocupación por la naturaleza; y ya no muy apropiado porque invoca una explicación amplia y vaga para acontecimientos que eran muy precisos, tales como la búsqueda de los escritos científicos griegos «perdidos», y en modo alguno sin precedentes. Hubo, por supuesto, dos grandes transfusiones textuales a la Europa latinizada: una en los siglos XII y XIII (la que dio origen a la ciencia medieval), la segunda, de erudición mucho más avanzada, en los siglos XV y XVI. Es razonable argüir que gran parte de la ciencia procedía de este segundo renacimiento clásico, que dio a Europa la casi totalidad de Galeno, el Ptolomeo «puro», Arquímedes y otros matemáticos griegos, los presocráticos (p. 22) y, sobre todo, Platón. Así, pues, ¿podemos considerar la ciencia moderna como el resultado de esta biblioteca más amplia, más variada y más apasionante, que, sin embargo, seguía incluyendo a los grandes filósofos medievales?

El estudio de un caso sencillo nos dará una respuesta directa y positiva. La nueva anatomía del siglo XVI —raíz delgada de la que nace toda la actual panoplia de la ciencia médica— fue ciertamente

9. Antonia McLean, *Humanism and the rise of science in Tudor England*, Heinemann, Londres, 1972.

«causada» por la recuperación de los textos anatómicos de Galeno. Su monumento más conocido (y más costoso para los bibliófilos), el *De humani corporis fabrica* (Sobre la arquitectura del cuerpo humano), de Andres Vesalio (1543) está sólidamente relacionado, línea por línea, con Galeno; pero Vesalio no se hace *eco* de Galeno. No se consideraba a sí mismo como un simple editor o expositor —aunque desempeñó ambas funciones—, sino como crítico y, si hacía falta, innovador. Con sus propios ojos había explorado el cuerpo humano muchísimo más que Galeno. No titubeó en disputar la aseveración galénica de que los grandes vasos sanguíneos del cuerpo tienen su origen en el hígado, pues, a su juicio, lo tenían en el corazón. Fíjense en que ésta es una prueba de observación y no de razonamiento, y que, al parecer, Vesalio encuentra la perfección del conocimiento en el futuro en vez de en el pasado. Ésta era una característica importante del intelectual renacentista —Leonardo la compartía—, pero no era ubicua.[10] Además, la labor de Vesalio y de otros anatomistas contemporáneos se benefició de otras dos circunstancias que no tenían ninguna relación con el humanismo erudito. En primer lugar, si Vesalio disfrutaba de libertad para disecar cadáveres humanos y para llegar a ser profesor de anatomía (en Padua), fue porque el mundo medieval había institucionalizado la enseñanza de la medicina en las universidades y tolerado la disección (siguiendo los preceptos galénicos, por supuesto) como parte necesaria de la formación de los médicos. No fue el Renacimiento, sino la Edad Media, quien dio a Vesalio (como antes diera a Berengario da Carpi o más tarde a Fabricio) su oportunidad, una posición social ventajosa que le permitiría dedicarse a la exploración intelectual. En segundo lugar, el estudio del cuerpo humano y la anotación permanente de lo que se observaba al hacer la disección eran obra de los artistas gráficos. Jamás se había visto nada parecido al realismo «fotográfico» que buscaban los artistas, de los cuales Leonardo era el más estudioso y el más atento a la relación entre estructura y función, y, después de ellos, los anatomistas; nada induce a imaginar que los griegos llegaran a poseer algo semejante; las ilustraciones medievales son grotescas o, en el mejor de los casos, diagramas artificiales que tienen mayor utilidad como

10. Otro progresista era el médico francés Jean Fernel (1497-1558); véase C. S. Sherrington, *The endeavour of Jean Fernel*, Cambridge U. P., 1946, pp. 16-17: «Nuestra era hoy está haciendo cosas que la antigüedad no soñó».

mnemotecnia que como imágenes visuales. Es fácil ver de qué manera las nuevas técnicas de representación —reproducibles por impresión— transformaron la enseñanza y el estudio y, a decir verdad, incluso la visión del anatomista.

De aquí que la historia del sencillo contenido textual de los escritos de Galeno tenga sus complejidades, incluso en este breve análisis. Por lo menos hay que reconocer la diferencia significativa de marco social —pues la antigüedad, está claro, veía con la mayor repugnancia cualquier forma de disección, a menos que la ejecutaran los gladiadores en los juegos públicos— y el estímulo de la riqueza técnica. Complejidades parecidas esperan al historiador cuando estudia la innovación contemporánea pero desemejante de Copérnico. Su postura se acerca mucho a la de Vesalio porque también él valoraba su propia pericia técnica, esta vez como matemático (la trascendencia de las observaciones nuevas en su labor es mínima). Y, al igual que Vesalio, Copérnico tiene un modelo, el *Almagesto* de Ptolomeo —tres veces traducido al latín y, pese a ello, todavía inaccesible para los estudiosos del siglo xv—, que Copérnico sigue capítulo a capítulo. Pero la diferencia crucial entre los dos hombres es que Copérnico había encontrado un nuevo principio, un nuevo punto de partida para sus matemáticas, en el tratamiento de la Tierra como planeta. El triunfo de Vesalio fue metodológico, el de Copérnico fue intelectual, pues probó la validez de un principio nuevo (aunque, desde luego, no probó que la Tierra realmente se mueve). Por otra parte, si bien la anatomía del siglo xvi no le debía nada a la civilización afín del islam, es cuando menos posible que Copérnico utilizase recursos matemáticos creados en Persia casi doscientos años antes; en todo caso, ciertos rasgos técnicos, no ptolemaicos, de su astronomía eran de origen persa.

Estos datos inducen a pensar que había cierta irrealidad en el intento de buscar una inspiración nueva, más pura, en los escritos griegos, del mismo modo que había artificialidad en la afirmación de Maquiavelo de que la guerra moderna debía adoptar de nuevo las armas y las tácticas de las legiones romanas. No se podía prescindir de lo que había sucedido entre 1100 y 1400, del mismo modo que no se podía prescindir del cristianismo. El humanismo era una aspiración de una sociedad cambiante, a la cual daba elegancia, precisión y un fuerte toque de materialismo. A los innovadores como Copérnico o Harvey les proporcionaba excelentes antecedentes o autoridades

para apartarse del conocimiento ordinario, racional; pero puede que el humanismo no explique necesariamente por qué tales hombres deseaban descubrir nuevos antecedentes, por qué no se sentían satisfechos con lo convencional.

Según una conocida tesis, los convencionalismos del saber (la fijeza de la Tierra, la primacía del hígado) que T. S. Kuhn denominó originalmente «paradigmas» acaban por fracasar y son sustituidos cuando los ejemplos o los argumentos contrarios se multiplican hasta alcanzar un punto en que la tensión se hace intolerable. Sin embargo, este modelo sólo es parcialmente aplicable al Renacimiento, en parte porque, si bien cabría decir que la filosofía aristotélica constituye un paradigma, la disensión interna entre eruditos y universidades fue siempre fuerte, ya que, después de todo, la polémica es el corazón de la vida académica; en parte porque la idea de «paradigma» no parece apropiada para la mayoría de los aspectos de la ciencia de la baja Edad Media, y en parte porque en ellos los procesos de demostración y refutación de paradigmas parecen ser concurrentes. Si Copérnico atacó el paradigma de la fijeza y la centralidad de la Tierra, lo hizo aceptando todos los paradigmas matemáticos de la astronomía de Ptolomeo. O, por expresarlo de un modo más general, el mundo intelectual del siglo XV eran tan confuso y rudimentario, estaba tan absorto en buscar a tientas un poco de verdad y certidumbre, que difícilmente podía haber un conflicto entre «verdades» y «refutaciones», y no podemos decir que las refutaciones nacieran de nuevos descubrimientos basados en datos, o de inconsistencias percibidas hasta aquí, o de deficiencias objetivas o lógicas de otros tipos (aunque todo el mundo sabía que éstas existían; casi *nunca* se da el caso, en ningún período, de que el conocimiento existente se considere perfecto). Por ejemplo, el análisis cualitativo aristotélico de la materia y el cambio no era más defectuoso en el siglo XVI que antes, ni estaba más expuesto a la refutación experimental, pero, a pesar de ello, las opiniones de los filósofos tendían continuamente a favorecer un análisis más materialista, cuyo modelo era el de los presocráticos y atomistas griegos.

Aquí deberíamos tomar nota y aceptar el comentario que hizo Collingwood hace mucho tiempo: si bien las palabras con que se expresa un problema pueden seguir siendo las mismas, entre grupos distintos de hombres, en épocas diferentes, las preguntas que se for-

mulan son en realidad muy distintas.[11] Para descubrir cuál es la pregunta real, no basta con leer las palabras que la expresan, sino que tenemos que interrogar la mente del que habla. Así, en relación con la teoría de la materia, bien podemos suponer que Aristóteles no hace la pregunta incontestable: «¿de qué está hecha la piedra?», sino más bien, «¿qué hay en la piedra que afecta nuestros sentidos con una sensación de frialdad, dureza, aspereza, etcétera?», a la cual su teoría cualitativa da una respuesta adecuada. De esta manera puede dar una explicación del mundo de la sustancia al hombre, el ser sensible. Mas para el Renacimiento —en parte porque creían que el mundo lo había hecho un Creador partiendo de algo— tenía sentido preguntar: «¿cuál es la materia que precede a la sustancia? ¿Y de qué forma la materia produce las cualidades de la sustancia, tales como la piedra?». En términos de esta pregunta totalmente distinta, las respuestas del atomismo o de la filosofía mecánica, rechazadas por Aristóteles en relación con su pregunta, tienen sentido y las cualidades, que ya no se consideran como materiales, pasan a ser nombres que damos a las sensaciones que experimenta el ser sensible. El materialismo poseía el encanto de la frescura, proporcionaba un nuevo juego intelectual (la explicación de las propiedades reales de las cosas, como la dulzura, en términos de los movimientos hipotéticos de partículas imaginarias), tenía el mérito de ser más presentable como modelo que la teoría cualitativa de Aristóteles, pero no es posible tenerlo por lógicamente superior a dicha teoría como no pasemos por alto el hecho de que responde a preguntas distintas de las planteadas en la mente de Aristóteles.

Por desgracia, la estrategia historiográfica de Collingwood, la que conduce al proceso de reconstrucción de pensamientos como núcleo de la tarea del historiador, nos deja con un problema todavía sin resolver: ¿Por qué cambian las preguntas que hacen los hombres?

Las preguntas pueden cambiar, aunque la fraseología permanezca constante, por muchos motivos: porque las personas que las hacen son distintas (astrónomos, por ejemplo, en vez de filósofos: Copérnico es un ejemplo magnífico de ello); porque cambian las condiciones materiales (así, los problemas tácticos de la guerra naval eran muy distintos para Jellicoe que para Nelson un siglo antes, aunque los objetivos de la guerra naval e incluso el proceso de aniquilamiento

11. R. G. Collingwood, *Autobiography*, Oxford U. P., Oxford, 1939, cap. 10.

de un buque tras otro continuaban siendo los mismos), o porque los pensamientos mismos cambian a causa, por ejemplo, de la refutación de lo que antes parecía una proposición sólida (así, en el juego del ajedrez, un gambito de ataque o una defensa que en un momento dado son populares pueden caer en desuso cuando a un jugador se le ocurre una respuesta nueva y más eficaz a ellos). No obstante, sería un error suponer que los cambios de las preguntas ocurren *sólo* cuando al interrogador lo mueve otro interés (como, por ejemplo, cuando es alguien que ejerce algún oficio práctico en vez de ser un filósofo) o, a la inversa, *sólo* porque ha habido algún cambio metafísico que hace más aceptable una respuesta diferente (lo cual, huelga decirlo, significa que la pregunta real que se ha hecho ya no es la misma), o que los cambios de pregunta obedecen sólo a que se han descubierto algunos datos nuevos por casualidad, mediante experimentos o por otros medios. La realidad histórica parece ser, y es más bien insatisfactoria, que estos cambios se producen gradualmente, insidiosamente, y sin que nadie delibere conscientemente sobre la conveniencia o inconveniencia de alterar las preguntas. Buen ejemplo de ello es la teoría «newtoniana» de la gravedad durante el siglo XVIII, que empezó con la pregunta «¿puede la gravedad, una fuerza, ser un atributo de la materia?» (respuesta: no) y terminó con la pregunta «¿puede la gravedad, una propiedad universal de la materia, no ser su atributo?» (otra vez la respuesta es «no»). Sin embargo, no hubo ninguna refutación formal de la primera postura, auténticamente newtoniana.

Tal vez la «causa» más obvia de la revolución científica que pueda sugerirse es que representa el florecimiento selectivo de ciertas tradiciones medievales. Nadie duda que la revolución científica fue una desviación de la corriente principal del saber medieval tal como se cultivaba en las universidades (de hecho, fue una reacción contra ella), pero algunos eruditos eminentes han creído que en la corriente principal había otros corrientes que hacían que las ideas avanzasen en la dirección que tomaría la ciencia moderna. Pierre Duhem (1861-1916), por ejemplo, creía que la ciencia de la mecánica —la ciencia que Galileo fundó de nuevo y que él relacionó con la cosmología— fue objeto de perfeccionamientos tan importantes en el siglo XIV que a Galileo le bastó con redescubrir, generalizar y reformular lo que los «precursores» medievales y renacentistas ya sabían antes que él; Galileo demostró en toda su plenitud la fuerza de la herramienta que

ellos habían forjado.[12] Duhem llamó en especial la atención sobre planteamientos hechos en la Edad Media que eran muy análogos al posterior concepto de la inercia, y sobre el fructífero análisis matemático del movimiento acelerado. De hecho, Duhem demostró que algunos filósofos de las universidades medievales estaban enseñando ideas sobre el movimiento y la mecánica que no tenían nada de aristotélicas, que estaban basadas conscientemente en la crítica de los juicios del propio Aristóteles y cuyo espíritu se acercaba mucho más al lenguaje del siglo XVII. De modo parecido, Crombie ha señalado la importancia del empirismo en los análisis medievales de la lógica, así como la feliz utilización de experimentos en la óptica medieval, cuyo ejemplo más notable es el estudio de los colores del arco iris que Teodorico de Freiburg llevó a cabo a principios del siglo XIV.[13] Por otra parte, no hay duda de que esto dejó muy atrás las ideas pobres e indefinidas de los griegos acerca de la luz y los colores, por lo que en 1637 a Descartes le bastó con dar un solo paso. Al igual que Duhem, Crombie afirma que los filósofos medievales habían proporcionado el «modelo» de un tipo nuevo y más moderno de ciencia, que sólo necesitaba que lo perfeccionasen y ampliasen para impulsar el conocimiento por sendas nuevas y poco convencionales.

Las investigaciones de historiadores como los citados —hay muchos más— han hecho, durante el último siglo, que la antigua imagen de la vida intelectual en la Edad Media quedase totalmente desfasada. La escolástica no produjo solamente telarañas, como creía Francis Bacon, ni fue una simple meditación inacabable sobre los escritos de Aristóteles y un puñado de otros autores: era crítica, innovadora, matemática, incluso experimental. A decir verdad, en ella podemos encontrar toda suerte de anticipaciones de la filosofía y las matemáticas posteriores, del mismo modo que en la India del siglo IX había matemáticos capaces de resolver problemas aislados que en Occidente no tendrían solución hasta la época de Newton. Pero una vez nos hemos formado el concepto más alto posible del saber medieval, sigue siendo difícil encontrar dentro de él una revolución científica embrionaria, excepto en el sentido de que la una necesariamente precedió a la otra. Entre otras cosas, parece que hubo un

12. Pierre Duhem, *Études sur Léonard de Vinci*, Hermann, París, 1906-1913.
13. A. C. Crombie, *Robert Grosseteste and the origins of experimental science*, Clarendon Press, Oxford, 1953.

derrumbamiento histórico, una ruptura de continuidad entre finales del siglo XIV y mediados del XVI. Gran parte de los logros medievales fueron olvidados o devaluados; sin duda es muy improbable que Descartes supiera algo de Teodorico, o Galileo de Juan Buridán y de Nicolás Oresme.[14] Puede que ello se debiera en parte a la «reacción clásica» humanística. Algunos de los nuevos y apasionantes temas del siglo XIV sobrevivieron al Renacimiento, pero no todos, y, al parecer, su tratamiento permaneció estático. Cuando menos tendría que afrontarse el problema del resurgimiento de una tradición moribunda. Lo que es aún más serio: al llevar a cabo un examen histórico más concienzudo, se ha observado que los paralelos que trazó Duhem entre el pensamiento medieval y el moderno distan mucho de ser exactos, esto es, sigue habiendo ciertas diferencias importantes entre la utilización medieval y moderna de frases parecidas. Sobre todo ha sido necesario poner de relieve el carácter conjetural de la mayor parte de la mecánica medieval, que era un sutil juego intelectual en lugar de un intento de explicar el mundo natural real. Se basaba en suposiciones que nadie tomaba por verdaderas y, si bien sus aspectos más matemáticos dan una impresión profunda del poder y la acuidad de la inteligencia humana, siguen perteneciendo, cuando se colocan en su contexto contemporáneo, a algún mundo de abstracciones filosóficas más que al mundo de la física matemática. De igual manera, el descubrimiento de verdades nuevas con la ayuda de globos de agua o de imanes y el arte más general de la invención que se asocia con Roger Bacon no parecen haber producido una metodología duradera ni creado ninguna tradición perdurable.

Podemos creer que la cultura medieval fue una condición necesaria para la revolución científica, sin ver de qué manera pudo ser una condición suficiente. Podemos asociar el declive de esta cultura con el declive económico y demográfico que siguió a la Peste Negra (1345-1346), que de esta forma interrumpió la promesa intelectual de la alta Edad Media. Pero es difícil aceptar la continuidad ininterrumpida o incluso periódica como explicación suficiente de la explosión de actividad científica original que se registró en el siglo XVI. El historiador se ve obligado a buscar nuevos impulsos que expliquen el enorme cambio de carácter filosófico entre los siglos XIV y XVI y los

14. Marshall Clagett, *The science of mechanics in the Middle Ages*, University of Wisconsin Press, Madison, 1959.

progresos que hizo el Renacimiento en campos como las matemáticas puras, la astronomía o la anatomía gráfica, cuyos antecedentes medievales eran poco inventivos. Sin duda es significativo que los campos del triunfo medieval, la mecánica y la óptica, no iniciasen la revolución científica y que en vez de ello no se convirtieran en frentes de investigación activa hasta finales del siglo XVI.

En años recientes una corriente de ideas igualmente poderosa pero del todo distinta ha encontrado un cambio total de perspectiva mental atribuible al dominio de Platón sobre Aristóteles. La Edad Media había aceptado literalmente que Aristóteles depusiera a su maestro Platón (y a todos sus otros predecesores) y, a decir verdad, no había buscado nada de los escritos de Platón más allá del *Timeo*, que había causado poca impresión. Todo esto cambió en el siglo XV, especialmente en los neoplatónicos florentinos, sin que tampoco hubiese una razón obvia para ello, exceptuando que Platón era nuevo y apasionante desde el punto de vista intelectual.

Hace ya tiempo que se reconoce la trascendencia que este renacer platónico del siglo XVI tuvo para la evolución de la ciencia moderna: «la magia, la astrología y la alquimia —nacidas todas ellas del neoplatonismo— dieron el primer estímulo eficaz a la observación de la naturaleza y, por consiguiente, a la ciencia natural», escribe un autor.[15] Sin embargo, los diversos hilos de la madeja de ideas se mezclan de una manera confusa y parecen conducir de unos orígenes inciertos a extremos muy diferentes. El hilo más verdaderamente platónico, procedente del *Timeo*, era que Dios, el arquitecto de la naturaleza, es, al igual que el arquitecto humano, un geómetra. Esto puede llevar a las pautas de la cristalografía o a las de la ley periódica en química, o puede conducir a ciertos elementos de la francmasonería, donde arengan (o arengaban) al neófito en términos que empiezan así: [16] «Adán, nuestro primer padre, creado a imagen de Dios, el gran Arquitecto del Universo, debía de tener las Ciencias Liberales, especialmente la Geometría, escritas en su Corazón». Otros hilos atravesaban la escuela neoplatónica de filósofos, que escribían muchos siglos después de la muerte de Platón, en los siglos III y IV d. C., hasta llegar

15. *Encyclopaedia Britannica*, 1929[14], pp. 16, 220; el escritor (tal vez Adolf Harneck) pone de relieve el platonismo y el neoplatonismo como estímulos del empirismo en oposición al «dogmatismo racionalista» de las escuelas.

16. Frances A. Yates, *The Rosicrucian Enlightenment*, Routledge, Londres, 1972, p. 213.

a la numerología, la magia y otras artes esotéricas totalmente extrañas a la mente del propio Platón, mientras que otros produjeron un misticismo trascendental que poco después sería absorbido por el cristianismo. No está del todo claro cómo la auténtica filosofía de Platón o incluso de sus seguidores (entre los cuales destacan Plotino y Proclo) llegó a ser la madre de la magia natural, es decir, las operaciones mágicas sin la ayuda de demonios. No obstante, en lo que hace al Renacimiento, es seguro que a la filosofía neoplatónica redescubierta por Marsilio Ficino en Florencia se la consideraba como proviniente de un sabio mucho más venerable, Hermes Trimegisto (el tres veces más grande), que había sido la primera y principal autoridad mundial en la filosofía de la naturaleza y el dominio mágico sobre la naturaleza. Sus escritos en el *Corpus hermeticum*, coetáneo de Moisés —al menos así se supone— fueron llevados a Florencia en 1460 para Cósimo de Médicis; en realidad fueron redactados por griegos del período neoplatónico, como demostró por vez primera Isaac Casaubon a principios del siglo XVII. De aquí que a Platón y a los neoplatónicos pudieran interpretarlos como magos los estudiosos del Renacimiento, aun cuando sus obras no contienen elementos manifiestamente mágicos. En esta tradición Pico della Mirandola, contemporáneo de Ficino y hombre al que se mira con recelo, injertó otras ideas mágicas sacadas de la cábala hebrea, ideas relativas a talismanes y a la maravillosa significación de las transcripciones de letras y números, que el adepto podía utilizar para controlar la marcha de los acontecimientos. «Difícilmente puede sobrevalorarse la profunda importancia de Pico della Mirandola en la historia de la humanidad», ha declarado Frances A. Yates: «Él fue el primero en formular audazmente una nueva postura para el hombre europeo, el hombre como Mago utilizando tanto la Magia como la Cábala para influir en el mundo, para controlar su destino por medio de la ciencia».[17]

El argumento de *Giordano Bruno and the hermetic tradition* (1964), el ya clásico estudio de Miss Yates, era en esencia, como en esta última cita, no meramente que el neoplatonismo indujo a los hombres del Renacimiento a examinar la naturaleza —esto podían aprenderlo y lo aprendieron de otras muchas fuentes, incluyendo a

17. *Idem*, *Giordano Bruno and the Hermetic tradition*, Routledge, Londres, 1964, p. 110 [hay trad. cast.: *Giordano Bruno y la tradición hermética*, Ariel, Barcelona].

Plinio y los autores latinos que escribían sobre agricultura—, sino que les indujo a examinarla con la intención de dominarla. El utilitarismo de Francis Bacon lo ha «situado» históricamente Paolo Rossi de la misma manera, relacionándolo con la magia natural del siglo XVI.[18] Dame Frances ve la ciencia moderna como «tecnología teórica», como si los hombres debieran estudiar física con el fin de proyectar máquinas de vapor, o química para fabricar explosivos. Escribe acertadamente que los filósofos griegos no poseían ni buscaban el poder para influir en la naturaleza: comprender y raciocinar eran los límites de su ambición. Cuando hubieron llegado tan lejos en esta dirección como la filosofía exhaustiva y consistente de Aristóteles, su ambición intelectual se debilitó y no fueron más lejos. El neoplatonismo renacentista dio una nueva ambición, un nuevo objetivo para el conocimiento: el poder.

En esta formulación la hipótesis de los «orígenes mágicos de la ciencia moderna» —tema que abordó hace tiempo Lynn Thorndike,[19] que de modo parecido creía que la magia natural condujo al empirismo científico— se acerca mucho a los «orígenes de la ciencia moderna en los oficios artesanales», donde el progreso técnico se ve como el objetivo resultante del estudio de la naturaleza. Pero Miss Yates, observando que algunos historiadores de la ciencia han expresado cierta desesperanza en lo que se refiere a las causas de la revolución científica, habla también (y yo creo que acertadamente) de una «fuerza motora emocional» que impulsaba a Copérnico y de «entusiasmo emocional»:[20]

> Es un movimiento de la voluntad —escribe— que realmente origina un movimiento intelectual. Surge un nuevo centro de interés, rodeado de entusiasmo emocional; la mente se vuelve hacia donde la voluntad la ha dirigido y siguen nuevas actitudes, nuevos descubrimientos. Detrás de la aparición de la ciencia moderna había una nueva dirección de la mente hacia el mundo, sus maravillas y sus misteriosos funcionamientos, un anhelo y una determinación nuevos de comprender esos funcionamientos y obrar con ellos.

18. Paolo Rossi, *Francis Bacon: from magic to science*, Routledge, Londres, 1968 (ed. italiana, 1957).

19. Lynn Thorndike, *History of magic and experimental science*, Columbia University Press, Nueva York, 1923-1958.

20. Frances A. Yates, *op. cit.* (en nota 17), p. 448.

Y más adelante escribe:[21] «El retorno a lo oculto esta vez estimula la ciencia auténtica». Sin duda Miss Yates hace bien en resaltar la pasión por un nuevo tipo de conocimiento —la voluntad de encontrar algo mejor que el «racionalismo estéril» de la filosofía escolástica— y en creer que la búsqueda encaminada a satisfacer esta pasión ocasionó entusiasmo intelectual en hombres como Copérnico o Vesalio. Lo que parece dudoso es la fuerte asociación que se sugiere como esencial entre, por un lado, esta pasión y el sentido de la esterilidad del racionalismo que la provoca, y, por otro, el neoplatonismo, el ocultismo y la magia. Especialmente (ateniéndonos a la forma fuerte y más particular de la proposición, que es la que promueven tanto Miss Yates como Rossi) la conexión magia natural - ciencia aplicada - ciencia pura parece sumamente sospechosa. El concepto de «ciencia aplicada» en el Renacimiento es en sí mismo anacrónico, pero lo más importante es que si contemplamos detenidamente la labor de matemáticos, filósofos, médicos, etcétera, vemos que lo que hacen en realidad parece desviarse en la misma medida de lo mágico y de lo utilitario. Sería una tremenda ingenuidad creer que todas las matemáticas existían para la navegación y el apeo, que toda la astronomía se hacía en bien de la astrología, toda la botánica en beneficio de los herbolarios y toda la anatomía en bien de los cirujanos y así sucesivamente. A decir verdad, el entusiasmo que menciona Miss Yates con frecuencia parece relacionada no con la posibilidad de *dominar*, sino más bien de entender el *orden* en la naturaleza (orden astronómico, orden botánico, orden algebraico). Copérnico hizo del *orden* (palabra con la que no se refería a nada parecido a una jerarquía mágica) el criterio de la verdad en el universo; dentro del universo copernicano, por ejemplo, los grandes orbes de cada planeta son concéntricos, los tiempos periódicos aumentan ininterrumpidamente a medida que el planeta va alejándose del Sol y es posible formular el tamaño relativo de cada orbe. Nada de todo esto era posible antes, de manera que (como afirmó el propio Copérnico) su sistema parece ser más simétrico que cualquiera de los que lo precedieron.

También para Kepler el *orden* era el objeto de su búsqueda, cuando escribe sobre el copo de nieve como cuando escribe sobre el cosmos. La ordenación del universo que propuso Kepler puede compararse con distancias medidas y resiste bien la prueba. El orden má-

21. *Ibid.*, p. 450.

gico y las armonías ocultas que propuso John Dee —en su *Monas hieroglyphica*, por ejemplo— o que propuso Robert Fludd, aunque ejercieron una fuerte atracción en la imaginación de algunos hombres, no ofrecen proporciones que puedan comprobarse científicamente.[22] Son meras aserciones. Además, los matemáticos de verdad aportaron sólidas mejoras técnicas; del sistema de Copérnico pueden obtenerse efemérides mejoradas. Por otra parte, los matemáticos mágicos —al menos los ingleses, Dee y Fludd— no tienen ningún lugar en la historia de las matemáticas escrita por matemáticos. Esto no equivale a negar que Dee enseñara a los ingleses los principios de la cosmografía y la navegación y que fuese un hombre de reputación e influencia internacionales; sencillamente no descubrió nada nuevo. (Un siglo después otra figura muy influyente, el obispo John Wilkins, escribió un libro titulado *Mathematical magick* que se hizo popular, pero como matemático Wilkins es del todo insignificante.) Es obvio que cantar melodías órficas o hacer cálculos cabalísticos son actividades que en nada se parece a resolver ecuaciones cúbicas y posiblemente ni siquiera en el Renacimiento hubo alguien que imaginara lo contrario; que un verdadero matemático figure también en la historia de las artes esotéricas, cual es el caso de Girolamo Cardano, es muy excepcional. Generalmente, los geómetras y los algebristas trataban de distanciarse de cuanto oliera a magia y misterio, que ellos consideraban perjudiciales y engañosos.

Veamos a continuación un problema todavía más amplio. Gran parte del debate sobre la revolución científica ha girado, durante los veinte últimos años, en torno a la importancia de los «programas» nuevos para el conocimiento: ¿debería el conocimiento ser práctico y realista y sensato (como se dice que deseaban los «artesanos»); o debería centrarse en misterios mágicos y herméticos; o debería basarse totalmente en la observación y los experimentos; o tomar la demostración matemática como prueba de su rigor? El hermetismo y el neoplatonismo, o el paracelsismo, podemos considerarlos apropiadamente como programas para el conocimiento, al igual que los programas de Bacon y Descartes, articulados con mayor claridad y filosóficamente avanzados. Ahora bien, a pesar de la tendencia de los

22. Sobre Dee, véase Miss Yates, *op. cit.* (en nota 16), quien considera a Dee como el de *facto fons et origo* de la orden Rosacruz; véase también su *Theatre of the world*, Routledge, Londres, 1969. Sobre Robert Fludd, véase *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, Vrin, París, 1943, pp. 103-109, 367-370.

autores a ver tal o cual programa como *el* único que realmente importó algo, podemos tener la certeza de que cada uno era favorable a un campo amplio del conocimiento y ajeno a los demás, del mismo modo que cada uno atraía a ciertos lectores y significaba poco para otros. Es obvio que el baconismo surtió gran efecto en la historia natural, pero ninguno en la astronomía de observación, por no decir en la astronomía matemática. Aunque sea un comentario trivial, diré que debe de ser engañoso que la historia dé importancia a uno de estos programas a expensas de todos los demás. Había muchas corrientes distintas, incluso opuestas, y todas ellas acabaron contribuyendo a la misma revolución científica: en el mismo momento en que los filósofos físicos se esforzaban por librarse de Aristóteles, los primeros estudiantes de embriología en Europa (Coiter, Fabricius, Harvey) lo adoptaban por considerarlo un buen guía. De modo parecido, durante el mismo período la astronomía se estaba volviendo más exquisitamente cualitativa (Galileo) y más precisamente cuantitativa (Brahe, Kepler). Estas aparentes paradojas abundan, por lo que en realidad no nos sirve ninguna fórmula sencilla que supuestamente proporcione una clave mística de los acontecimientos. En cada situación concreta intervenían factores diferentes.

No es menos importante hacerse cargo de que gran parte del desarrollo científico tuvo lugar con independencia de cualquier programa, a menos que digamos que el humanismo renacentista constituía un programa. (Si así lo hacemos, debe quedar claro que, a diferencia de los otros, no tenía ninguna relación especial con la naturaleza o con el estudio de la misma; a decir verdad, los humanistas —Erasmo, por ejemplo— desdeñaban la filosofía contemporánea.) Figuras como Copérnico y Vesalio no pueden asociarse fácilmente con ningún movimiento epistemológico o metodológico, o con corrientes de cambio social, sino que sobresalen claramente como productos triunfantes del Renacimiento clásico textual. La historia natural era otra rama de la actividad que despertaba gran entusiasmo, enriqueciendo enormemente el conocimiento humano de las cosas vivas por medio del estudio y la exploración, estimulados por la atención renovada a los autores antiguos. De ella nació una nueva institución cultural del siglo XVI, el jardín botánico, paralela al observatorio (particular) que empezaba a aparecer en la astronomía. También es importante no permitir que el carácter polémico de las ideas de un innovador intelectual como Copérnico oscurezca la importancia del

creciente volumen de obras que no eran polémicas; no hubo oposición al renacer de la astronomía matemática o de la medicina científica como tales, y exponentes de la ciencia como Tycho Brahe o Juan Fernel —a los que difícilmente se puede tachar de loros rutinarios— no se vieron envueltos en ninguna crisis intelectual. La botánica, las matemáticas puras, la geografía, la mecánica (antes de 1632), la embriología y la óptica son ejemplos de actividades científicas que florecieron e hicieron verdaderos progresos en los siglos XV y XVI sin que se crearan fuertes tensiones internas, sin que apareciesen conflictos entre los hechos y las teorías, resumiendo, sin polémicas obvias en torno a problemas generales. El conocimiento y su estructura teórica evolucionaron tranquilamente, sobre todo en el más conservador de los ambientes (supuestamente), la universidad, y apenas hace falta buscar una explicación del cambio catastrófico dentro de ellos como la que podría proporcionar la atracción de nuevos programas. Mucho medievalismo murió en el siglo XVI —fue eliminado discretamente de los cursos universitarios— y si preguntamos qué fue lo que ocupó su lugar, la respuesta debe ser: en parte el clasicismo redivivo (Aristóteles además de Arquímedes y Lucrecio), en parte innovaciones, algunas de las cuales (en grado aún no determinado) se veían influidas por los programas nuevos como, por ejemplo, el hermetismo y el baconismo.

Si, como ha argüido Charles Schmitt (justamente, a mi modo de ver), las universidades continuaban su importante labor científica y no polémica (además de dar cobijo a algunos innovadores radicales), entonces es natural suponer que los programas no tradicionales eran atractivos en gran medida para los no académicos:[23] Ficino, Pico, Paracelso, Dee, Bacon, fundadores de nuevos programas para el conocimiento, eran todos ajenos a las universidades. Así, pues, los puntos de vista que tengamos sobre las causas de la revolución científica están íntimamente relacionados con nuestra apreciación de sus *dramatis personae*: ¿nace la ciencia moderna (podría decirse) de una huida intelectual de la *academe*? En un sentido, obviamente así fue: casi todos los hombres cultos de la Edad Media habían sido clérigos y académicos; una excepción fue Geoffrey Chaucer, poeta, escritor

23. C. B. Schmitt, «Science in the Italian universities in the sixteenth and early seventeenth centuries», en M. P. Crosland, ed., *The emergence of science in Western Europe*, Macmillan, Londres, 1975.

sobre astronomía, y administrador. A pesar de que hasta bien entrado el siglo XVIII continuó la importancia de un grupo al que podemos considerar como académico, los médicos, esto ya no era así ni siquiera a finales del siglo XV. Se estaba formando una población instruida que no era clerical ni académica. Por otro lado, la influencia de la universidad seguía siendo persuasiva, aunque más sutil, y la imprenta contribuyó a que aumentase. Leonardo da Vinci, por ejemplo, educado imperfectamente, absorbió ideas y terminología eruditas de los libros. El autodidacto solía buscar y leer el material que utilizaban los estudiantes, que gracias a la imprenta estaba más a su alcance, especialmente a medida que el latín fue haciéndose cada vez menos esencial incluso para el conocimiento avanzado; al fin y al cabo, en este período había sólo un modelo de cultura.

Si rechazamos la hipótesis de que el desarrollo y el cambio del conocimiento sólo se producen mediante procesos catastróficos, mediante el alivio violento, como en un terremoto, de una tensión creciente, entonces se hace menos apremiante la necesidad de introducir algún factor contundente para explicar la revolución científica. Las pruebas de un derrumbamiento gradual del escolasticismo —pero todavía no, por supuesto, de una desviación de la tradición griega— no son insignificantes. Las tenemos en la ascensión de la universidad profesional, como la de Bolonia; en las burlas de Erasmo; en que el estilo se prefiriese al argumento; en la muy citada tesis de 1536 de Petrus Ramus: «Todo lo que decía Aristóteles era ficticio»; en la aceptación ansiosa de autores clásicos poco conocidos y el olvido de los «árabes» que la acompañó; en el renacer de la curiosidad por el mundo exótico, por las plantas y los animales y por las habilidades humanas poco frecuentes; en todos los aspectos de un «renacimiento científico» que duró de 1450 a 1550 aproximadamente el historiador puede encontrar los cimientos de la subsiguiente revolución científica. Es cierto que surgirían tensiones después de esta última fecha, pero más parecen ser epifenómenos de la propia revolución científica que causas de la misma.

No hubo una razón única para la evolución de la ciencia en los comienzos de la Europa moderna, ya que somos libres de argüir que cada uno de los rasgos de la civilización europea fue un factor que contribuyó a ello. Es tentador sugerir que esta civilización era más intelectual que otras, como la china o la árabe, pero esto difícilmente puede ser cierto excepto en el sentido de que fue quizá relativamente

más educada. Ninguna civilización comparable había producido algo como la universidad medieval, ya fuera en su forma o en su tamaño, y cuesta ver de qué modo hubiese podido nacer nuestra ciencia sin la universidad de las épocas medieval y posteriores. Creó una casta ilustrada que nunca estuvo compuesta exclusivamente por sacerdotes o burócratas; enseñó que la verdad nacía del argumento y de las pruebas, no de la mera autoridad; prosperó gracias a la crítica y al debate. (También tenía sus puntos flojos, sus nimiedades, sus perogrulladas mil veces recitadas, su palabrería inacabable.) La universidad medieval daba a los hombres mucha libertad y había variedad entre un centro de aprendizaje y otro; no se imponía ninguna serie única de cursos y procedimientos, ningún dogmatismo unificado (abundaba el dogmatismo *local*). Para el islam sería una gran desventaja intelectual que su filosofía estuviera aún más enredada con su religión que la filosofía de la Europa cristiana. Occidente, al leer filosofía, ciencia y matemáticas en las obras de autores paganos, sabía que estos autores podían equivocarse, que muchos de ellos debían de estar equivocados en ciertos aspectos. Eran libres de creer que todo (excepto la religión) podía debatirse, pues todas las proposiciones relativas al mundo natural sólo podían ser ciertas de manera contingente. Esta libertad sin embargo, habría valido bastante poco si los eruditos europeos no hubieran aprendido también a tener un sentido de la realidad. El «sujeto humano» de Galeno había sido una ficción, montada con retazos obtenidos al observar la disección de hombres y animales; la astronomía de Ptolomeo, un mecanismo que permitía la calculación. Hasta la filosofía de Aristóteles parecía tratar más de definiciones, conceptos y abstracciones que de sólidos, líquidos y aires. La característica general de la reacción contra el escolasticismo primero, luego, más adelante, contra la ciencia griega convencional como se entendía a la sazón, fue, me parece a mí, un deseo de proposiciones demostrables acerca del mundo real: la sensación de que la filosofía de la naturaleza no era ningún juego intelectual, en el que ganaban más premios quienes daban las respuestas más elocuentes, sino el resultado del estudio de todo lo que nos rodea. El ejemplo más conocido de esto es, desde luego, el esfuerzo de Copérnico por encontrar una astronomía matemática «real» (físicamente válida), pero se hace igualmente evidente en el esfuerzo de los botánicos italianos por verificar la flora «real» del norte y el centro de Italia. Obviamente, la descripción exacta, concienzuda, es la forma más

elemental de aspirar a la realidad, y el análisis o la teoría forzosamente invocarán entidades (como, por ejemplo, átomos o fuerzas) que ya no son «reales» en el sentido inmediato de la palabra. ¿Es el movimiento más real que la dulzura y, si lo es, por qué? Valió la pena hacer la pregunta, porque podía contestarse y, de hecho, gran parte del progreso conceptual de la ciencia ha consistido sencillamente en preguntar «¿Es X más real que Y?». En algunos casos, el hecho de formular la pregunta ha tenido más importancia que la respuesta obtenida.

Capítulo 2

EL RENACIMIENTO CIENTÍFICO DEL SIGLO XVI

A principios del siglo XVII Francis Bacon denunció elocuentemente las «bellas meditaciones, especulaciones e invenciones del género humano» que hasta entonces habían pasado por filosofía natural y las tachó de «falsas... inútiles para hacer descubrimientos de valor práctico», y la lógica en que se basaba la calificó de «inútil para el descubrimiento de las ciencias».[1] Con todo, está claro que la misma lógica, procedente de los *Analíticos posteriores* de Aristóteles, y la misma filosofía de la naturaleza habían satisfecho a muchos filósofos geniales; es evidente que la diferencia entre los hombres que enseñaban el sistema del mundo aristotélico y los hombres que más adelante lo rechazaron no era simplemente una diferencia de calibre intelectual. Sólo cuando cambiaron los criterios sobre lo que aportaba una explicación científica adecuada, y cuando se hicieron nuevas exigencias de aplicación práctica de las fuerzas ocultas de la naturaleza, pudo cobrar forma un escepticismo efectivo sobre la validez de la filosofía anterior y de sus bases intelectuales. Cuando eso ocurrió, la fuerza cohesiva de la ciencia medieval y el grado de su consistencia por medio de la cual una parte reforzaba a otra cobraron importancia al fortalecer su resistencia a las críticas.

La ciencia medieval no era de gran alcance en su extensión real ni especialmente exacta al exponer los hechos que sí abarcaba. Hasta las autoridades de mentalidad más empírica podían ser curiosamente inexactas; el más grande de los teóricos de la óptica medieval (después del árabe Ibn al-Haytam), Teodorico de Freiburg, expone inco-

1. *Novum organum*, libro I, p. X, XI.

rrectamente el radio del arco iris primario, mientras que Pedro de Maricourt (1269), que le precedió en unos cincuenta años en el campo del magnetismo, da como hecho comprobado la revolución de una piedra imán circular en armonía con los cielos.[2] En el campo de la astronomía, la otra rama de la ciencia donde la exactitud de las medidas siempre se había reconocido como un desiderátum, el Occidente latino virtualmente no había empezado a este nivel práctico; ciertamente, no había hecho nada que pudiera compararse con lo que se hacía en Oriente. Así, en el reino de los datos, habría sido fácil encontrarles defectos a la filosofía y la medicina medievales, si la exactitud de los datos hubiera tenido un papel destacado en su caída final. Las teorías, sin embargo, estaban articuladas con mucha más firmeza y fuertemente engranadas. El paso del concepto de los elementos (tierra, agua...) a las cualidades (cálido, húmedo...) en física, y así a los humores (sangre, flema...) y luego, en medicina, a los temperamentos (vehemente, flemático...) es un ejemplo obvio aunque elemental: de hecho, si bien Galeno no era en modo alguno el dócil esclavo de Aristóteles en las cuestiones profesionales (Galeno, por ejemplo, negaba que el corazón fuera el foco de las sensaciones), sí le seguía en la mayoría de las cuestiones de filosofía general y *Weltbild*. De modo parecido, Aristóteles había hecho de la física y la cosmología una unidad coherente que la astronomía matemática, como hemos visto, no había podido criticar epistemológicamente por cuenta propia. La visión medieval del mundo, aunque en la mayoría de los aspectos nos parezca estrafalaria y contraria a la realidad, poseía una especie de solidaridad monolítica: no era fácil hacer cambios graduales en ella. Tenía que ser creíble en conjunto; incluso, pongamos por caso, poner en duda la doctrina convencional sobre la sangría o flebotomía podía tener tremendas repercusiones cosmológicas. Dicho de otro modo, aquel valiente argumento conservador: «éste es el primer paso hacia el desastre...» tenía una fuerza tremenda y la inserción *ad hoc* de una explicación nueva en el lugar de otra vieja (como en el caso de la teoría corpenicana de la gravedad) resultaba extremadamente arriesgada e ineficaz. En cambio, era mucho más fácil aceptar las mejoras técnicas de tipo aparentemente no filosófico.

El siglo XVI muestra de dos formas contrastadas estas facetas de

2. A. C. Crombie, *Robert Grosseteste and the origins of experimental science*, Clarendon Press, Oxford, 1953, pp. 210, 252.

la revolución científica. En el año 1543 se publicaron dos libros que se han convertido en clásicos de la historia de la ciencia: *De humani corporis fabrica*, de Andrés Vesalio (1514-1564), y *De revolutionibus orbium coelestium*, de Nicolás Copérnico (1473-1543). No eran libros modernos por su contenido y a un lector moderno no le resultará fácil comprenderlos, ni siquiera traducidos a su lengua, pues Vesalio no pudo superar las limitaciones de la fisiología galénica del mismo modo que Copérnico no logró apartarse del sistema artificial de los círculos perfectos, pero ambos inspiraron una serie de actividades que conducirían a la promulgación de conceptos muy distintos en el plazo de un par de generaciones. Los dos libros y sus autores, por muy parecida que fuera su repercusión general en el movimiento científico, son del todo desemejantes. *Sobre la arquitectura del cuerpo humano* es principalmente significativa como obra descriptiva, las bellas disecciones de un gran anatomista inmortalizadas por las nuevas habilidades de los dibujantes y los que hacían las piezas de madera para los grabados; las ilustraciones no tienen nada de naturalistas en el sentido general de la palabra —¿quién ha visto alguna vez un esqueleto moralizando sobre una tumba con un paisaje paduano al fondo?—, pero como representación de estructuras y sus disposiciones en el espacio constituyen el primer gran paso hacia el «realismo fotográfico» en la ciencia, paso que, por cierto, los herbolarios estaban dando al mismo tiempo en sus libros. *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, en cambio, es una obra de filosofía y, sobre todo, de matemáticas técnicas; Copérnico no era un observador, ni siquiera un hombre que usara críticamente las observaciones ajenas; tampoco aspiraba a que sus predicciones fueran de una exactitud sin precedentes. Vesalio era un hombre joven que daba muestras de una asombrosa precocidad, de una rapidez fantástica al trabajar, pues dio mucho material a la imprenta en los seis años que siguieron a su llegada a Padua (1537); la mayor parte del libro se preparó después de 1540. Copérnico era un moribundo que gozaba de una fama considerable aunque había publicado pocas cosas y que llevaba casi cuarenta años acariciando su gran idea. Vesalio era un maestro ambicioso y popular que contribuyó a que la universidad de Padua adquiriese eminencia como centro para la enseñanza de la medicina, mientras que Copérnico era un modesto administrador eclesiástico que tuvo un solo discípulo verdadero, Georg Joachim Rheticus (1514-1576). Vesalio fundó *un método de descubrimiento* —en esencia, durante casi doscientos

años, todo examen del funcionamiento de los organismos vivos se fundaría en la anatomía—, mientras que Copérnico explotó un magnífico principio nuevo, el principio según el cual en el sistema de los cielos existe una reciprocidad perfecta entre sistemas heliocéntricos y sistemas geocéntricos. El hecho de que fuera partidario del sistema heliocéntrico inventado por él mismo, sistema en el que la Tierra era un planeta más, no fue determinado de ninguna manera por datos obtenidos de la observación; su preferencia se basaba más bien en consideraciones indemostrables (aunque plausibles) de simplicidad, orden y armonía. Como ya hemos mencionado, su propia aceptación, claramente expuesta, de una cosmología heliocéntrica fue ocultada durante mucho tiempo por el Prefacio de Osiander, de modo que durante la mayor parte de una generación Copérnico pareció ser sencillamente el inventor de un modelo matemático elegante pero inherentemente inverosímil. En el reino de la opinión o la teoría Vesalio era mucho más reservado. Había estudiado profundamente a Galeno, una de cuyas obras había editado, y seguía respetándole como una de las mayores autoridades en el campo de la anatomía humana. Es cierto que sabía (y no se cansaba de repetirlo) que Galeno sólo había disecado monos y otros animales; era capaz de discrepar de él y llamarle «imbécil» (porque el origen de la gran vena central del cuerpo, la *vena cava*, prefería localizarlo en el corazón en vez de en el hígado, como hacía Galeno);[3] también insistía una y otra vez en que Galeno había sido engañado, pero, a pesar de ello, llevó la comprensión de las funciones corporales poco más allá del punto donde la había dejado Galeno. Fue Vesalio quien llamó la atención sobre la ausencia de poros en el séptum intraventricular del corazón, a través de los cuales la sangre podría pasar del sistema venoso al arterial, pero le tocó a su sucesor, Realdo Colombo (1510-1559), proponer una nueva ruta para el paso de la sangre por vía de los pulmones. Ni teórico ni filósofo, Vesalio, con su magnífico libro, mejoró inmensamente el alcance y la precisión del conocimiento relativo a la estructura del cuerpo humano, que probablemente él había estudiado de manera más detenida y frecuente que cualquier otro hombre en la historia, y éste sería un fundamento esencial para la fisiología racional a partir del descubrimiento por Harvey de la circulación de la sangre (1628); entonces, y sólo entonces, surgieron

3. *De Fabrica*, libro III, cap. 6.

conflictos serios entre las ideas médicas antiguas y modernas. Con todo, cabe afirmar que los comienzos de la revolución científica pueden localizarse tan acertadamente en el *De fabrica*, y en la serie de anatomías ilustradas de la que fue el primer y más notable ejemplo, como en el *De revolutionibus* de Copérnico. Como ejemplos de innovación, los dos libros se complementan mutuamente.

Sea cual sea el punto de vista filosófico, sociológico o histórico desde el que se contemple la historia de la ciencia moderna, la distinción general entre la línea *conceptual* de avance cuyo principal precursor es Copérnico, reforzada por una gran competencia teórica, y la línea *objetiva* ejemplificada por Vesalio, reforzada a su vez por una suprema competencia técnica, sigue siendo válida; cualquier rama de la ciencia rozará la esterilidad si hay un desajuste duradero entre estos dos tipos de innovación. El primero puede verse moldeado, durante su marcha, por consideraciones que a la sazón sean estrictamente ajenas a la ciencia (como la idea arquitectónica del universo que tenía Copérnico); el otro, enriquecido por la buena suerte y la casualidad, por no decir las técnicas instrumentales y de otros tipos (como en el caso de la introducción del telescopio en la astronomía): no importa, la fecundidad intelectual depende del maridaje de estos dos modos de investigación. Después del teórico Copérnico llegó Tycho Brahe; después del anatomista descriptivo Vesalio, William Harvey.

Durante la Edad Media el médico profesional recibía una formación culta en ciertas universidades; el oficio del cirujano era mucho más humilde, adquirido, al igual que cualquier otro, mediante el aprendizaje. (El pueblo en general, por supuesto, recibía asistencia médica de hombres que ejercían la medicina popular, empezando por la comadrona —*wise woman* en inglés y *sage-femme* en francés, es decir, 'mujer sabia'— que asistía a las parturientas.) Al igual que todas las disciplinas universitarias, la medicina se aprendía en libros, familiarizándose plenamente con las opiniones y la experiencia de los mejores autores. De «ciencia médica» no había nada, exceptuando (a partir del siglo XIV y quizá sólo en Italia) la oportunidad de contemplar cómo un cirujano abría el cadáver de algún criminal a lo largo de un período de cuatro días. A decir verdad, en esta etapa enseñarles anatomía a los estudiantes de medicina habría sido perder el tiempo, pese a las muy sensatas exhortaciones de Galeno, toda vez que la mala salud no se atribuía a una disfunción orgánica, sino a

una disfunción sistémica (que se manifestaba por medio de signos externos en la piel, la sangre, la orina y las heces). Y, desde luego, el médico no trataba directamente el cuerpo: esta tarea les correspondía al cirujano y al apotecario. El «hígado» (como productor de un humor, la sangre) era muy importante para el médico como concepto, pero en realidad no era necesario que se familiarizase con él como órgano grande, blando, rojo y sangriento en el cadáver de un hombre. Si bien las pautas de educación tienen que apoyarse mucho en el libro y aspirar a que los alumnos dominen los sistemas de conocimiento existentes (porque el llamado «método heurístico» es, después de todo, una impostura, ya que formula las preguntas y conduce al estudiante hacia las respuestas «correctas»), la distinción entre una y otra radica en si el alumno encuentra o no que el contenido de los sistemas de conocimiento (que constituye el aspecto vital de ellos, en contraposición al aspecto dogmático) procede en parte de la realidad, esto es, de la experiencia, o totalmente de las críticas y la erudición dedicadas a los textos. Como en la filosofía de la naturaleza de la Edad Media, que sólo muy de vez en cuando —como en la óptica— contemplaba la realidad desde una perspectiva nueva, también en medicina lo principal era la erudición: dominar las teorías «antiguas» de la salud y la enfermedad y aplicarlas al alivio del paciente que sufría. Ampliar los conocimientos investigando la realidad fuera de estos sistemas hubiera parecido presuntuoso, improcedente e imposible.

En lo que se refiere a la ciencia médica y al ejercicio de la medicina hasta bien entrado el siglo XVII, la autoridad principal fue la de Galeno (129-199 d.C.). Huelga decir que el aspirante a médico estudiaba también otros autores; Galeno era más venerado que leído, de hecho, y su autoridad se ejercía por medio de delegados, la mayoría de los cuales eran islámicos; el Renacimiento cambiaría esto, elevando el prestigio de Hipócrates y Aristóteles e introduciendo al médico romano Aurelio Cornelio Celso (*c.* 25 d.C.). Avicena (980-1037), el más grande los científicos del mundo árabe y su principal médico, a menos que concedamos el título a Rhazes, produjo en su *Canon* 'de alrededor de un millón de palabras' el que fue probablemente el mejor compendio médico de todos los tiempos, muy alabado por médicos tanto del islam como de la cristiandad. Fue traducido al latín por Gerardo de Cremona en el siglo XII y siguió utilizándose como libro de texto en las universidades de Montpellier y Lovaina

hasta mediados del siglo XVII. El mismo traductor hizo la mayoría de las versiones de los escritos del propio Galeno que se estudiarían durante centenares de años, pero sus principales textos anatómicos siguieron estando en griego y árabe: antes del siglo XVI en Occidente sólo se utilizaba un breve resumen de su anatomía. Gerardo de Cremona y otros tradujeron del árabe muchísimos más textos médicos, especialmente los escritos del gran clínico Rhazes (854-925/935), incluyendo su libro dedicado al califa al-Mansur y sus monografías sobre dos enfermedades determinadas, el sarampión y la viruela. Antes del siglo XVI estos extensos comentarios y añadidos islámicos a los originales griegos tuvieron una influencia decisiva en la comprensión de la medicina griega por parte de los europeos; todos ellos figuraron entre los primeros libros que se imprimieron, algunos de ellos muchas veces.

No es fácil exagerar la fuerza y la longevidad de la tradición galénica. Cuando las damas de la época de Miss Auden padecían un tifus exantemático, cuando los cirujanos de dos generaciones después hablaban de «pus laudable», las ideas galénicas seguían en activo. En 1559-1560 el Colegio de Médicos de Londres pudo ordenar que se sometiera a «juicio» a un médico de Oxford, John Geynes, por afirmar en público que Galeno se había equivocado en varios sentidos, y obligarle a someterse. Sin embargo, John Caius, el presidente del colegio y segundo fundador del *college* de Cambridge que lleva su nombre, fue un gran humanista y el primer inglés que escribió una monografía sobre una enfermedad concreta (la enfermedad del sudor, identificada a veces con la gripe). También fue autor del primer libro sobre los perros ingleses. Es agradable dejar constancia de que el temerario doctor Geynes, después de haberse reconciliado con sus colegas, llegó a ser funcionario del Colegio de Médicos y el primero de sus miembros que murió en servicio activo en el extranjero, en el sitio de El Havre (1563).[4] Es mucho más probable que las supuestas equivocaciones que, según Geynes, cometió Galeno tuvieran que ver más con el tipo filosófico de medicina que con su base científica en la anatomía: cuando incluso a los médicos se les educaba como lógicos —y un licenciado en filosofía y letras tenía derecho a ejercer— más que como observadores, les resultaba infinitamente más fácil detectar errores filosóficos que anatómicos o fisiológicos. La admiración por

4. Sir George Clark, *History of the Royal College of Physicians of London*, Clarendon Press, Oxford, 1964, pp. 1, 109-110.

Galeno era tan extravagante que los primeros anatomistas, cuando no se ajustaban a las descripcions galénicas, tendían a atribuirlo más a su propia falta de habilidad que a la de Galeno. Esto hace pensar en los filósofos aristotélicos posteriores que atribuyeron los descubrimientos de Galileo con el telescopio a defectos de sus ojos o de sus instrumentos. Sólo tardíamente y con titubeos reconoció Vesalio la sencilla verdad de que la formación de vasos sanguíneos debajo del cerebro a la sazón llamada la *rete mirabile*, hallada apropiadamente por Galeno en la cabeza del animal, no ocurre en el hombre:

> Grandes cosas, que a veces superan la razón, atribuyen a Galeno (que era con mucho el principal de los maestros de disección) los médicos y anatomistas que han seguido sus pasos, y (fuertemente) se afirma ese bendito y maravilloso plexo reticular (*rete mirabile*) que él introduce en alguna parte de sus libros, del que también hablan sin parar y a menudo los médicos, pues, aunque no lo hayan visto (ya que es casi inexistente en el cuerpo humano), lo describen con la autoridad de Galeno. De hecho, por no decir nada de los demás, difícilmente podría maravillarme más mi propia estupidez y respeto excesivo por los escritos de Galeno y otros anatomistas, porque yo mismo cultivaba tanto mi respeto por Galeno que nunca intenté mostrar la cabeza humana en las disecciones públicas sin la de un cordero o un buey, con el fin de suplir con la cabeza del cordero la falta de lo que era del todo imposible de descubrir en el hombre, e imponerme así al auditorio en vez de decir que no podía encontrar ese plexo tan conocido de nombre por todo el mundo. Pues nada de ese plexo reticular del que habla Galeno lo forman las arterias carótidas (en el hombre).[5]

Sólo gradualmente aprendieron los anatomistas a ver incluso las estructuras más gruesas del cuerpo con ojos que no fueran los de Galeno, el que había sido uno de los más grandes científicos médicos, y demostró en Roma, más o menos al mismo tiempo que Ptolomeo en Alejandría, ciudad de cultura que Galeno admiraba pero que, al parecer, nunca visitó, el vigor y la calidad residuales de la ciencia helenística en aquel momento de madurez en que podía aprovechar seiscientos años de pensamiento y experiencia desde Aristóteles. La deficiencia técnica de Galeno, el hecho de que por maravilloso que

5. *De Fabrica*, libro VII, cap. 12; cf. C. Singer y C. Rabin, *A prelude to modern science*, Cambridge U. P., Cambridge, 1946, pp. XLIII-XLIV.

fuera nunca hubiera disecado personalmente un cuerpo humano completo como hacían los anatomistas del Renacimiento, apenas se tuvo en cuenta antes de la época de Vesalio. Como indicó el propio Galeno, parece ser que la disección humana como auxiliar de la ciencia se practicó sólo durante un breve período en Alejandría, cientos de años antes de su época. La nomenclatura y la clasificación también eran defectuosas en la anatomía griega y, por supuesto, como sólo se transmitieron textos escritos, sigue habiendo algunas dudas sobre qué es exactamente lo que se está describiendo. La transmisión islámica de la ciencia médica griega no había hecho nada por mejorar los legados anatómicos, pues los árabes no practicaban la disección y las escasas ilustraciones que se conservan en sus manuscritos médicos adolecen de crudeza esquemática. Al parecer, en Europa el estudio sistemático de la anatomía empezó en el siglo XII, cuando la ascensión de la famosa escuela médica de Salerno, aunque la práctica propiamente dicha de la disección humana fue un fenómeno del norte de Italia. La recepción de los escritos de Aristóteles en el siglo XIII, que interrumpió temporalmente el desarrollo de una tradición médica puramente galénica, tuvo como compensación un interés más profundo por la disección, floreciendo dentro de los extensos privilegios de los nuevos *studia generales* (escuelas para «estudios generales» o universidades). La disección del cuerpo humano se autorizó debido en parte a las necesidades de la cirugía y en parte al reconocimiento jurídico (nacido en la escuela de derecho de Bolonia) del valor de las pruebas forenses obtenidas de la autopsia. En todas partes y en todas las épocas se ha visto con repugnancia el despedazamiento de cuerpos humanos para satisfacer la simple curiosidad (en todas las sociedades modernas existen reglas muy estrictas al respecto). Así, pues, el hecho de que en la Edad Media estuviera limitado no es tan extraordinario como el que se hiciese sistemáticamente, por vez primera en la historia de la humanidad. Sea como fuere, la disección en público de cuerpos humanos era corriente en Bolonia a principios del siglo XIV; el procedimiento jurídico para averiguar la causa de la muerte se había transformado en un medio de instruir a los estudiantes. Al enseñar anatomía en Montpellier en 1304, Enrique de Mondeville utilizaba diagramas ilustrativos que probablemente eran derivados de los que antes se emplearan en la universidad de Bolonia.

Los estudios medievales de anatomía alcanzaron su cenit en Mondino de Luzzi (*c.* 1275-1326), maestro en la citada universidad y

autor de un libro de texto que se utilizó durante casi doscientos años (impreso en latín, italiano y francés). Mondino estabilizó el método según el cual el profesor leía el texto (el suyo propio) en voz alta, añadiendo lo que hiciese falta, un *ostentor* señalaba la estructura que estuviese describiendo, mientras el *demonstrator*, que era un cirujano, se encargaba de llevar a cabo la disección propiamente dicha para mostrar las estructuras, así como la exposición regular de seis días que se hizo habitual, empezando por las generalidades y un examen de las autoridades en la materia, e iniciando la disección propiamente dicha por las partes blandas del abdomen, pasando luego a los órganos de reproducción, el tórax y su contenido, la cabeza, el esqueleto y las partes periféricas. Su enseñanza era de origen galénico, por supuesto, y más directamente árabe: perpetuó muchos errores crasos incluyendo aquellos que, como el hígado de cinco lóbulos, se derivaban de los animales; cometió errores de los que Galeno no era culpable. Su objetivo era pedagógico; no pretendía aumentar el conocimiento. Pero fue el primer anatomista de la Europa occidental.

Es fácil comprender de qué manera el método de Mondino degeneró en ritual académico, aunque popular, según parece, en el siglo XV. El libro era mucho más importante que el cuerpo y el estudiante era un simple espectador que podía considerarse de lo más afortunado si lograba ver algo, lo que fuera, de las estructuras más finas. El propósito de la demostración no era en modo alguno inculcar las virtudes del empirismo como método científico. De hecho, el propio Galeno, al mismo tiempo que insistía con frecuencia y pintorescamente en el mérito del aprendizaje anatómico para el médico, distaba mucho de ser un simple empírico. Para interpretar lo que veía, necesariamente tenía que introducir ciertos principios no empíricos de interpretación, tales como la asociación entre forma y función (así, podemos creer que el hígado es el órgano del cuerpo encargado de fabricar sangre porque es el órgano que más se parece a un coágulo de sangre: las arterias, ejerciendo un movimiento —pulso— activo, son gruesas y fuertes, mientras que las venas son delgadas y blandas), y especialmente el gran principio según el cual la naturaleza no hace nada en vano: por lo tanto, cada uno de los rasgos del cuerpo tiene un propósito que puede comprenderse y el sistema es en verdad óptimo para la vida de los hombres. Así, podemos deducir del estudio y los experimentos (obstruyendo los vasos) que los riñones, y no la vejiga, son los órganos primarios de la secre-

ción urinaria: y que, si bien el corazón de los mamíferos tiene dos cavidades con cuatro válvulas (mientras que a los anfibios les va muy bien con un órgano más sencillo), esto puede explicarse por la presencia de pulmones. Durante muchos siglos la demostración de que las estructuras eran perfectamente capaces de funcionar seguiría siendo el objetivo de la «anatomía teórica» —difícilmente puede hablarse aún de fisiología en el sentido moderno de la palabra— y se recurriría a los experimentos y la observación; sólo con el desarrollo del análisis del organismo en términos mecánicos y de anatomía *comparada* empezaron a aparecer alternativas a la teleología. Asimismo, Galeno era aún más dado que Aristóteles a personificar la naturaleza, dando a esta palabra el sentido de un agente creativo sabio, presciente, benévolo y omnipotente; de hecho, la naturaleza de Galeno desempeña el papel del Dios cristiano, de tal modo que esta manera de hablar resultaba fácilmente comprensible para los naturalistas y médicos cristianos de siglos posteriores, que siguieron sintiéndose cómodos con la filosofía biológica de Galeno incluso cuando mostraban desdén ante su versión específica del hecho y la explicación.

También aquí cabe observar el contraste general entre los aspectos biológicos y físicos de la revolución científica. Mientras los físicos parecen depender mucho, y desde el principio, de los cambios de perspectiva metafísica —pues ésta es la base del copernicanismo, por no decir de la obra de Kepler y Galileo—, los aspectos biológicos raramente parecen alzarse muy por encima del nivel fenomenológico y, en sus más altos vuelos teóricos, como en el caso de William Harvey, extenderse sólo para abarcar sistemas limitados. No hay ninguna señal de cambio metafísico en los principios de la biología, con la excepción del mecanicismo cartesiano. Pero en modo alguno puede decirse que todos los naturalistas o médicos posteriores a Descartes fueran mecanicistas, y muchos de los que sí lo eran empleaban el mecanicismo en relación con organismos vivos sólo de manera instrumental, haciendo caso omiso o negando sus consecuencias metafísicas como, de hecho, hiciera el propio Descartes en relación con el hombre: porque si (con Descartes) consideramos que el cuerpo humano es mecánico, pero que el hombre no es una máquina, no hay ninguna razón no solipsista para no extender el mismo razonamiento a los animales, que evidentemente poseen los sentidos del placer y el dolor, y tal vez alguna facultad de raciocinio, igual que el hombre. Así que, después de todo, el mecanicismo biológico de Descartes se con-

virtió (exceptuando unos pocos filósofos del siglo XVIII) más en una transformación universal de la explicación sistémica que en un cambio metafísico.

Pero nos estamos adelantando demasiado. Volviendo al renacimiento de la anatomía a finales del siglo XV, vemos que se le asocia con el texto impreso y con la utilidad de las ilustraciones hechas con grabados en madera, además de con el renovado vigor de la medicina como estudio académico profesional (su único rival era el derecho). La primera mitad del siglo XVI revela un grupo considerable de competentes anatomistas prácticos en ejercicio, italianos la mayoría de ellos: Berengario da Carpi, Johannes Dryander, Nicolás Massa, Charles Estienne, Giovanbattista Canano, además de Vesalio, que era uno de los más jóvenes. Todos ellos salvo Massa (1536) utilizaban la nueva técnica de las figuras impresas. Fiel al espíritu de la publicación humanista de textos clásicos de medicina (el más famoso de los nuevos descubrimientos fue, en 1426, el de *De medicina octo libri*, escrito por Celso en el siglo I d.C. e impreso por vez primera en Florencia en 1478), Johannes Günther, que a la sazón enseñaba en París y tenía a Vesalio como alumno, publicó en 1531 la primera traducción latina del principal libro de texto sobre la disección que escribiera Galeno, su *Sobre los procedimientos anatómicos* (o, para ser más exactos, la porción de este libro que se había conservado en griego): el propio Vesalio editaría más adelante esta importante obra y dos estudios menos importantes sobre la disección, también de Galeno, en la edición de Giunta de las obras del gran médico de la antigüedad (1541). En Inglaterra Thomas Linacre, fundador del Colegio de Médicos (1518), traducía muy activamente el griego de Galeno al latín, incluyendo entre los textos traducidos la principal obra de Galeno sobre los principios de la «fisiología», *Sobre las facultades naturales* (1523).[6] Las traducciones de Linacre solían reimprimirse en la Europa continental y Erasmo le hizo un gran cumplido al decir que Linacre había hecho a Galeno «tan elocuente e informativo (en latín) que incluso en su propia lengua podía parecer que no lo era tanto». Se prestó una atención especial a la nomenclatura exacta, pues la tradición árabe-latina medieval se había hecho totalmente confusa (se utilizaban dos nombres para la misma estructura, o un nombre para

6. F. Maddison, M. Pelling y C. Webster, eds., *Essays on the life and work of Thomas Linacre*, Oxford U. P., Oxford, 1977.

dos estructuras), de modo que en este período se introdujo gran parte de la terminología de base griega de la anatomía bruta. Sin embargo, hay que distinguir, como es lógico, entre los que eran principalmente eruditos en este campo (como Linacre, Günther y Massa) y los que estaban haciendo verdaderos descubrimientos en la disección, como Berengario, Canano (el primero en descubrir las válvulas del sistema vascular) y especialmente Vesalio. La erudición por sí sola no bastaba para que se enmendasen los errores de las observaciones de Galeno. En algunos sentidos (como hemos visto en el caso del doctor Caius) una erudición griega más exacta podía resaltar en vez de debilitar la tendencia a idolatrar a los maestros antiguos, al dogmatismo.

Otra importante fuente de inspiración, además de medio de comunicación, salió del movimiento naturalista en el arte que también produjo los rinocerontes de Alberto Durero y las ilustraciones de Hans Weiditz para *Imágenes vivas de las plantas* (*Herbarum vivae eicones*, 1530), de Otto Brunfeld. Los pintores y escultores italianos ya estudiaban la anatomía superficial del cuerpo humano, en busca de realismo gráfico, antes de que finalizara el siglo XV (los bosquejos que se conservan de Miguel Ángel y Rafael, por ejemplo, hacen pensar que de vez en cuando practicaban la disección a escondidas). Leonardo da Vinci (1452-1519) fue mucho más lejos en el mismo sentido y al morir dejó gran cantidad de dibujos anatómicos, que iban de apuntes que parecían tomados del miembro disecado a dibujos complicados que solían reflejar ideas tradicionales pero equivocadas del contenido del cuerpo. La valoración apropiada de estas hojas requiere ojos de experto, pues, contrariamente a la ingenua suposición de que los artistas como Leonardo sólo dibujan con el lápiz lo que ven con los ojos, los dibujos anatómicos de Leonardo parecen completamente «naturales» y realistas incluso cuando muestran formas que son imposibles, como ocurre en su célebre dibujo del útero. A decir verdad, sean o no correctas (y de vez en cuando Leonardo daba muestras de aguda observación), estas figuras constituyen el primer intento de «fotografiar» estructuras disecadas, y también de hacer un estudio comparado de las formas —sobre todo del esqueleto— de especies diferentes. Iniciadas a principios del decenio de 1490, preceden a las figuras análogas de Vesalio en medio siglo y son de calidad enormemente superior a todos los demás dibujos anteriores a Vesalio. Seguramente Leonardo empezó con un impulso artís-

tico, pero, si fue así (como en todas sus otras investigaciones) la curiosidad filosófica se apoderó de él, como demuestran tanto el hecho de que adquiriese familiaridad académica con la anatomía —la anatomía galénica de los libros, en especial la edición italiana de Mondino (1493)— como sus propias notas y comentarios en las hojas, que a veces son muy complejas e indican que investigaba con gran atención el funcionamiento de las cuatro válvulas del corazón; Leonardo fue el primero en declarar (contrariamente a Galeno) que «el corazón es un músculo principal con respecto a la fuerza». Quería saber cómo funciona el cuerpo, tratando de aplicar principios hidráulicos al movimiento de los alimentos en el intestino y de la orina en sus vasos. Hasta llevó a cabo experimentos con animales, incluyendo ranas y cerdos. Pero no todos sus dibujos proceden de la vida real: algunos representan su visión imaginaria de lo que encontraba en los textos (el *Timeo* de Platón entre ellos), o una comparación analítica entre especies distintas, mientras que otros son modelos mecánicos del funcionamiento del cuerpo tal como él lo ve.[7]

Es obvio, por supuesto, que la preocupación artística por sí sola no hubiera podido dar origen a la anatomía científica, pero también lo es que Leonardo avanzó hacia una reforma del conocimiento anatómico (en la medida en que se lo permitieron las lecturas limitadas y el escaso material disponible para la disección humana). Sus propios métodos indisciplinados de estudio y su incapacidad para la organización y la clasificación no le permitieron empezar siquiera una exposición sistemática del cuerpo humano: en todo caso, el secreto que envolvía a sus láminas de trabajo le impidió ejercer una influencia significativa en sus sucesores inmediatos, tanto en este sentido como en casi todos los demás. Lo que sí demuestra Leonardo, dada la posibilidad de la disección humana, es la fertilidad y, de hecho, la necesidad de estudiar el libro y el cuerpo al mismo tiempo. Leonardo hablaba de *Anatome naturale*, que Vesalio intenta también en la *Fabrica* hasta rozar la parodia. El naturalismo era el estilo del día, para el estudiante de la naturaleza tanto como para el artista; ambos empleaban las mismas técnicas de dibujo y de reproducción de la imagen, ambos seguían los mismos convencionalismos estéticos. Como

7. Kenneth D. Keele, «Leonardo's anatomia naturale», en *Yale Journal of Biology and Medicine*, 1978 (reimpresión). C. D. O'Malley, ed., *Leonardo's legacy*, University of California Press, Berkeley y Los Ángeles, 1969.

escribió Leonardo, el anatomista necesitaba «el buen arte del dibujante que corresponde a la representación» que debe ir «acompañada del conocimiento de la perspectiva». Del mismo modo que, según el nuevo ideal de la enseñanza, el propio profesor debía mostrar de forma adecuada y sistemática las estructuras a los estudiantes, también al hacer un libro las ilustraciones tenían que ir con el texto y tomarse del cuerpo disecado (no se sabe quién dibujó las figuras que aparecen en la *Fabrica* de Vesalio, ni cómo funcionó realmente la colaboración entre anatomista y artista, si lo había). De esta manera la lógica del naturalismo, la de la escuela de medicina y la de la imprenta se combinaron para crear un nuevo tipo de ciencia escrita, basada en la observación, y, al proceder así, el anatomista comprobó que el cuerpo humano no siempre se ajustaba a las descripciones de Galeno; así que con el tiempo aprendió a apartarse con mayor confianza del texto galénico y a buscar su autoridad en la observación sola. Unos cuantos médicos conservadores eran muy conscientes de los peligros que ofrecían los textos ilustrados: la excesiva dependencia de la disección y su representación visual podía conducir al descuido del conocimiento y la sabiduría de Galeno, que eran superiores. De hecho, tanto en Leonardo como en Vesalio las ilustraciones son a veces más exactas y menos tradicionales que las palabras. No puede exagerarse el hecho de que la empresa de recuperar la comprensión de toda la gama de la exposición médica griega era en sí misma algo muy nuevo y apasionante, toda vez que lo que se sabía al respecto antes del Renacimiento era muy limitado, aburrido y pedantesco; y si algunos de los grandes profesionales de la época como, por ejemplo, Vesalio en la anatomía y Fernel en la «fisiología», empezaron a dar muestras de espíritu crítico, esto no era más que un efecto secundario de su empresa principal consistente en asimilar toda la riqueza de la tradición griega. Estudiar anatomía humana, preparar complicadas ilustraciones anatómicas, no significaba en sí mismo criticar a Galeno: la crítica no vino hasta que aumentó la experiencia. Así, pues, la investigación más allá de Galeno, incluso contraria a Galeno, fue el fruto del intento de realizar sus descripciones y comprender sus teorías.

La *Fabrica* de Vesalio es un libro voluminoso y bello: la cooperación estrecha, ferviente, entre el anatomista y el impresor (Johannes Oporinus de Basilea) lo colocó entre la docena de obras maestras de la bibliografía científica. Ningún otro anatomista de la época produjo

un libro de belleza siquiera comparable (la *Anatomía* de Berengario, por ejemplo, es una auténtica desgracia); esto contribuyó a su éxito, pero los dibujos anatómicos grabados en cobre de Bartolomé Eustachio (*c.* 1505-1574), contemporáneo de Vesalio, fueron igualmente plagiados en otros libros hasta finales del siglo XVIII. La historia de estos grabados es curiosa: preparados en 1552, el propio Eustachio imprimió ocho ilustraciones pequeñas en 1564, luego los treinta y nueve restantes permanecieron extraviados durante ciento cincuenta años hasta que fueron redescubiertos, adquiridos por un papa (Clemente XI) e impresos en 1714. Son de la mayor calidad, en especial la ilustración del sistema nervioso simpático «generalmente considerada una de las mejores jamás producidas». En cierto sentido, pues, no había nada único en Vesalio y en la magnificencia de la *Fabrica* (obra que molestó a Eustachio por su hostilidad hacia Galeno); de haberse invertido el destino histórico de las figuras de Vesalio y Eustachio, seguramente la historia no habría sido muy distinta, pese a que Eustachio no escribió ni una sola palabra para acompañar a sus figuras; hasta es posible que la anatomía hubiera avanzado con mayor rapidez todavía. Eustachio era un hombre de gran experiencia y unos cuarenta y cinco años de edad cuando inició su principal tarea de ilustración; Vesalio —si fechamos su principio cuando se estableció en Padua en 1537— sólo contaba veintitrés. Difícilmente podía afirmar que escribía con conocimiento maduro, ya que, si bien había estudiado medicina tanto en Lovaina como en París, su experiencia de la disección debía de ser muy limitada. Allí se había versado en el galenismo humanístico más que en un espíritu crítico independiente. Las primeras publicaciones notables de Vesalio fueron una revisión de las *Instituciones anatómicas según Galeno*, de Guinter, y sus propias *Seis tablas*, ambas en 1538. La primera no necesita comentario; las *Seis tablas* —seis hojas de dibujos anatómicos con notas explicativas— son exposiciones galénicas de anatomía humana que contienen muchas cosas imaginarias o de origen literario más que obtenido en la mesa de disección. Las ilustraciones contienen muchos errores y los expertos en Vesalio están de acuerdo en que no pueden compararse con las de la *Fabrica.* (Con bastante injusticia, los expertos tienden a hacer responsable de la flojedad de las *Seis tablas* al artista que las dibujó, el flamenco Jan Stephen van Calcar, a quien, sin embargo, Vesalio dedicó grandes elogios, y arguyen que la misma mano no pudo haber dibujado las figuras de la *Fabrica.*) Sabemos que

al establecerse en Padua y, sobre todo, al iniciar su gran tarea a partir de 1539, Vesalio tuvo acceso a abundante materia prima, la suficiente para prescindir del viejo estereotipo de empezar por las partes internas y blandas (estereotipo que Eustachio aún seguía). Parece razonable suponer que la reputación de la *Fabrica* y la creciente confianza con que discrepaba de Galeno las debía Vesalio a esta inmensa cantidad de material; sin embargo, hace años Charles Singer opinó que «Unos cuantos comentarios suyos revelan un disector activo con menos experiencia que sus contemporáneos Berengario da Carpi, [Nicolás] Massa y Charles Estienne».[8] Dado que Vesalio abandonó la investigación y la enseñanza por el puesto de médico imperial al poco de terminar la *Fabrica*, sus principales años de actividad fueron realmente pocos.

Mientras que los comienzos de la ciencia experimental fueron penosos y titubeantes, las ciencias biológicas de la anatomía y la botánica ofrecían un campo extenso para el desarrollo de habilidades de observación dentro de un contexto académico relativamente tradicional y aquiescente. Hombres como Vesalio y Eustachio llegaron a ser médicos de primera categoría. Ayudadas por el naturalismo, estimuladas por la imprenta, la observación y la anotación evolucionaron sin problemas partiendo del estudio textual. Fuera de esto no había ningún poderoso empuje metodológico; ocurrió más bien que el esfuerzo por emular la práctica de Galeno llevó al abandono de los preceptos galénicos. Los anatomistas que se liberaron, siquiera parcialmente, de la inclinación natural a imitar ciegamente a los maestros clásicos inventaron por casualidad nuevas técnicas de observación y nuevos criterios para juzgar tanto las exposiciones de hechos (por ejemplo, la tradicional pero errónea tesis: «En el hombre, el riñón derecho está constantemente más arriba que el izquierdo», porque en el sistema aristotélico de valores *derecho* es invariablemente superior a izquierdo, *siniestro*) como las proposiciones teóricas acerca de, por ejemplo, las funciones de las venas y las arterias. No puede decirse que en este momento naciera algún método nuevo y consciente de observación y experimentación científicas, pero sí que el momento en que una forma aceptada de narrar hechos y teorías —rica en un nivel, avanzada en el otro— fue por vez primera modi-

8. C. Singer en *Studies and essays in the history of science and learning offered to George Sarton*, Schuman, Nueva York, 1947, p. 47.

ficada de modo eficaz y permanente mediante el recurso a los datos reales. Por vez primera, a mediados del siglo XVII, un conjunto de hechos originalmente examinados y cuidadosamente verificados fue cotejado con una descripción literaria, tradicional, y se comprobó que ésta era defectuosa. El proceso fue demasiado lento y esporádico para que se produjeran serias tensiones internas en el seno de la clase médica, al menos antes de la época de Harvey, y no fue la menor razón de que así fuera el que existiesen otras autoridades (Platón, Aristóteles, Hipócrates...) aún más antiguas y más grandes que el mismísimo Galeno y a las que a veces podía apelarse como testimonio contrario a las enseñanzas galénicas. Sin embargo, poco a poco —y el proceso fue todavía más gradual en botánica— los nuevos descubrimientos se combinaron para demostrar que todo el conjunto de la anatomía humana descriptiva, y cuando menos gran parte de la teoría explicativa asociada a ella desde tiempo inmemorial, debía reformarse empleando los métodos de la observación meticulosa y el pensamiento independiente. Mientras que los hechos de la experiencia a que habían apelado los teóricos antiaristotélicos del movimiento, tales como la mayor eficacia del lanzamiento de un trozo de plomo que de un pedazo parecido de corcho, eran vulgares y triviales, la nueva anatomía recurría a la explotación sistemática no sólo de la técnica perfeccionada de disección (vista en el estudio de los huesecillos de la oreja, por ejemplo), sino también a las de clasificación y nomenclatura descriptiva.

Ciertamente, quien utilizó de forma más completa y notable estas técnicas, de gran repercusión inmediata, fue Vesalio en la *Fabrica*. Todos los autores coinciden en que su exposición de la anatomía humana destacó en los primeros tiempos de la edad moderna y basan este juicio en el texto de Vesalio —aunque en su mayor parte sea una paráfrasis del *Sobre el uso de las partes*, de Galeno—, así como en sus ilustraciones, que son aún más elocuentes. No fue un caso único, pero sí fue el exponente más feliz de un procedimiento nuevo que encontraría partidarios en toda Europa, a algunos de los cuales Vesalio no vaciló en tratar injustamente. Entre los predecesores inmediatos de Vesalio, Berengario da Carpi, cuyos *Comentarios* con toscas ilustraciones a la breve anatomía de Mondino, que ya se había impreso, se publicaron en 1521, destacó por su indecisión en seguir a Galeno. Otro, Charles Estienne (1505-1564), ya trabajaba en láminas anatómicas en 1530, aunque sus «Tres libros sobre la disección de

las partes del cuerpo humano» no se publicaron hasta dos años después de la *Fabrica*. Miembro de una familia de impresores parisienses, estudió con Sylvius y se doctoró en medicina en Montpellier; además de ejercer la medicina, fue un editor y traductor muy activo. Se le atribuyeron varias observaciones anatómicas originales y estaba tan seguro como Vesalio de que el historiador del cuerpo humano sólo debía dar cuenta de lo que fuese manifiesto y evidente a sus ojos; sin embargo (al igual que Vesalio), siguió a Galeno bastante de cerca en sus comentarios sobre las funciones que debían cumplir las estructuras. Las repulsivas figuras de Estienne (que no son ni «fotográficas» ni esquemáticas) no merecen que se las compare con las de Vesalio o Eustachio (pp. 81-82); sin embargo, su libro tenía la ventaja de estar traducido al francés; de hecho, también el *Epitome* de anatomía (1543) de Vesalio tardaría en traducirse al inglés.

El efecto de simultaneidad se ve realzado por Giovanbattista Canano (1515-1579), que, a decir verdad, colaboraba con Vesalio así como con Gabriele Fallopio (1523-1562), su alumno. La muy rara «Dirección ilustrada de los músculos del cuerpo humano» (1541 o 1543) de Canano se ocupaba sólo de los músculos del brazo, en veintisiete grabados en cobre de Girolamo da Carpi, un pintor de Ferrara, donde Canano nació y estudió. Éste fue el estudio más detallado de la generación «vesaliana». Naturalmente, había muchos más hombres menos notables que trabajaban en el mismo campo, sobre todo en Italia, donde la tradición proseguiría hasta finales de siglo.

Es evidente, pues, que el estudio de la anatomía por medio de la disección era un polo de desarrollo natural, cuya expansión y éxito no se debieron a un solo hombre, mucho menos a la fuerza de un genio determinado, sino que fueron fruto del vigoroso estado de las universidades italianas (en especial sus facultades de medicina) y de la libertad de investigación que ofrecían; Fallopio incluso salió bien librado de una acusación falsa de practicar la vivisección. La medicina era entonces (como siempre) de gran importancia, sobre todo porque el pueblo hablaba de las nuevas enfermedades y los nuevos remedios. El renacimiento del galenismo aportó el marco intelectual y la disciplina práctica para el cultivo de la anatomía en beneficio de la medicina y (como escribieron Estienne y otros) para la gloria de Dios y su creación.

Ciertamente, Vesalio no era único, aunque fuese *primus inter pares*. Poco se sabe de su personalidad. Sabemos que no estaba tan

versado en griego y otras lenguas antiguas como otros médicos de su tiempo. Tenía un buen concepto de sus propias facultades y, siguiendo la costumbre de la época, colmaba de improperios críticos a los demás. No obstante, la *Fabrica* es un monumento de la ciencia del siglo XVI que revela, tan fielmente como el *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico, el asombroso avance hacia la madurez y la independencia de la investigación registrado durante el anterior medio siglo. La *Fabrica* adquirió autoridad inmediata en su propio tiempo. Fue la realización, de un modo cuyo efecto total es superior al de las demás obras contemporáneas de índole parecida, de un concepto unitario de lo que debía ser una obra anatómica completa y nada hace suponer que este concepto, en relación tanto con el texto como con las ilustraciones, no fuera totalmente del propio Vesalio. Aspiraba a un estudio sistemático e ilustrado del cuerpo, parte por parte y capa por capa. El esqueleto y las articulaciones, los músculos, el sistema de las arterias, las venas y los nervios, los órganos abdominales, el corazón y los pulmones, el cerebro, se describieron y pintaron con una exactitud de detalle jamás conseguida anteriormente. De hecho, los grabados en madera a veces son mejores que el texto que ilustran, aunque en un lugar se reconoce que uno de los dibujos había sido modificado para que se ajustase a las palabras de Galeno. Fallopio llamaría la atención sobre el hecho de que, al tratar del riñón, Vesalio, sin decir nada, había sustituido el riñón humano por el del perro (debido a que el humano, por contener más grasa, se presta menos a la ilustración). Había muchos más errores que tuvieron que corregir Fallopio y los otros sucesores de Vesalio. Algunos temas enteros (el ojo; el sistema reproductor femenino) recibían un tratamiento especialmente defectuoso, debido en parte a la falta de material (al parecer, Vesalio disecó tres hembras solamente), en parte a la observación inexacta, en parte a la persistencia de tradiciones falsas. En un ejemplo clásico —al que volveremos más adelante— Vesalio reconoció que los llamados poros u hoyuelos de la pared (séptum) que divide las dos cavidades principales del corazón eran ciegos; por consiguiente, la sangre no podía atravesarlos para ir del lado derecho (venoso) del corazón al lado izquierdo (arterial). Dejó que el paso de la sangre a las arterias siguiera siendo un misterio, como lo llamó él; sin embargo, este misterio lo resolvieron fácilmente sus sucesores guiándose por una clara indicación del propio Galeno.

Aunque Vesalio y sus contemporáneos revolucionaron el conocimiento del cuerpo humano —la medida en que esto fue un logro individual o colectivo es poco significativa a largo plazo—, hay que reconocer que fue una revolución conservadora, pues no se atrevió a ir más allá del testimonio de los ojos para entrar en el campo, más extenso, de las teorías: los revolucionarios se enorgullecían defendiendo sus nuevos descubrimientos y de vez en cuando denunciaban con estridencia los errores del pasado, pero se daban por satisfechos colocando su nueva exactitud descriptiva firmemente en un contexto de familiaridad. Como escribió Charles Singer refiriéndose a Vesalio:

> Si se dice que a menudo corregía a Galeno, cabe contestar que sigue los errores de Galeno mucho más a menudo ... La *Fabrica* es, en efecto, Galeno con añadiduras renacentistas sumamente significativas. La más obvia e importante es la soberbia aplicación del método gráfico.[9]

Pero, por supuesto, el «método gráfico» —que no fue un invento de Vesalio— no afecta la cuestión de la exactitud de la explicación descriptiva (y funcional) que se da en el texto. Sin duda Singer tenía razón al decir que muchas cosas, incluso en este florecimiento de la anatomía a mediados del siglo XVI —ciertamente en los textos de Vesalio y Estienne, que eran los únicos que aspiraban a una exposición textual completa— seguían siendo en gran medida Galeno representado gráficamente: por otro lado, en el detalle, en el trazado de una estructura sobre otra empezaba a aparecer un orden de exactitud mucho más elevado.

Si a Vesalio se le considera preeminente entre los primeros anatomistas, ello no debe ser a expensas de sus contemporáneos, que también eran hombres dotados de habilidad y precisión, puesto que para ello habría que pasar por alto los descubrimientos de los demás y las equivocaciones de Vesalio. No fue Vesalio quien introdujo en el norte de Italia la tradición del estudio anatómico durante los pocos años que pasó allí, pues, como hemos visto, la disección ya se practicaba en varias universidades. En cuanto a la afirmación que se hace a veces en el sentido de que Vesalio fue el primer maestro de anatomía que hizo disecciones con sus propias manos ante los estudiantes —la escena idealizada en Padua es conocida gracias a la portada de

9. *Ibid.*, p. 81.

la *Fabrica*—, se ha dicho que ya en 1528, y en la facultad de medicina humanística de París, «se reconocía la participación de estudiantes y doctores en el proceso de disección». Dado que la anatomía se había convertido en una floreciente rama de los estudios, forzosamente cayó en desuso el antiguo método didáctico y literario de exposición, aunque Estienne nos dice que empleaba un cirujano para que le ayudase en la laboriosa tarea. Sin embargo, hay que concederle a Vesalio la parte de mérito que le corresponde por haber introducido cierto número de innovaciones en la práctica y la enseñanza de la anatomía, innovaciones que ampliaron sus posibilidades de descubrimiento. Y la *Fabrica*, con mayor riqueza que cualquier otro libro de anatomía de la época, trató de integrar el examen visual de la estructura con la comprensión intelectual de la función de un modo aún más estrecho que el propio Galeno. Vesalio, al igual que Galeno y, de hecho, que Estienne, comprendió que la anatomía es la base necesaria e ineludible de la filosofía médica; cierto es que él mismo no pudo avanzar mucho hacia la perfección de la fisiología —Sherrington arguyó que Jean Fernel mostró más discernimiento en este sentido, lo cual es tal vez algo injusto tanto para Galeno como para la *Fabrica*—,[10] pero llamó la atención sobre los puntos débiles de la explicación de Galeno que merecieron atención en el futuro. Posiblemente, podría creerse que llevó el contenido de la descripción anatómica más allá de un punto crítico: ciertamente, no hubo ningún retroceso, sólo un incremento continuo del profesionalismo. Era una base adecuada, u obra de consulta, que podía utilizarse como punto de partida para nuevos descubrimientos. En una ciencia descriptiva como la anatomía, el progreso depende de condiciones *sociales* —que pueda llevarse a cabo la disección humana, que exista un contexto para ella y que la empresa atraiga a científicos que formen (como en la Italia del siglo XVI) una especie de comunidad de investigación—; también depende de una condición *metodológica*, que realmente pueda hacerse la comparación entre «las cosas tal como las vemos» y las exposiciones (en los libros o las clases) sobre «las cosas que deben verse». No puede haber ninguna ciencia descriptiva de cosas invisibles. Había (y hay) muchas dificultades para interpretar o verificar las afirmaciones de Galeno relativas a las «cosas que deben verse

10. Sir Charles Sherrington, *The endeavour of Jean Fernel*, Cambridge U. P., Cambridge, 1946.

en el cuerpo humano: en parte porque se necesita una experiencia anatómica básica previa, en parte porque el lenguaje es oscuro (y a veces el texto es corrupto), en parte porque Galeno disecaba animales en lugar de seres humanos y no en menor medida (después de todo) porque el texto renacentista de *Sobre los procedimientos anatómicos*, al ser incompleto, no se ocupaba de todo el cuerpo. Así, pues, había que empezar de nuevo, reescribir la exposición de las «cosas que deben verse», utilizando a Galeno (porque no había otra guía) y al cuerpo propiamente dicho. Vesalio empezó de nuevo, hizo —aunque no fue el único— una nueva exposición de «lo que debía verse». La anatomía de Galeno (aunque no su fisiología y su medicina) ya podía olvidarse. Vesalio hizo que el estudio de *Sobre los procedimientos anatómicos* quedase reducido a una simple curiosidad por lo antiguo, no porque él fuera más exacto, sino porque (con el texto y las figuras) era mucho más inteligible. Ahora la anatomía podía partir de una base apropiada en su exposición de la realidad, sin necesidad de investigar la filología clásica para descubrir el significado de lo que Galeno escribía.

En ese sentido, la obra maestra de Copérnico es exactamente comparable con la de Vesalio: en los cursos elementales de astronomía continuaron enseñando a «Ptolomeo» de una forma envilecida y *La esfera* (*c.* 1230) de Sacrobosco siguió siendo el más popular de los textos de astronomía hasta finales del siglo XVI y después; pero, en lo que se refiere al desarrollo de la ciencia, el *Almagesto* de Ptolomeo dejó virtualmente de surtir efecto o influencia después de 1543. (Esto, desde luego, no significó también que se aceptase la opinión de Copérnico sobre la realidad del movimiento de la Tierra.) La astronomía seria había empezado de nuevo en Europa con el *De revolutionibus orbium coelestium* y éste era un hecho que aceptaban incluso aquellos que no eran capaces de seguir sus principios físicos.

Pese a ello, la astronomía permaneció con Copérnico en aquel mundo de lo artificial del que la anatomía trataba desesperadamente y con éxito de huir: a Copérnico no le interesaban ni la reforma práctica de la astronomía ni hacer nuevos descubrimientos en los cielos. Él estudiaba los libros más que la naturaleza propiamente dicha: las escasas observaciones dispersas que hizo personalmente no tienen ninguna trascendencia. Era un matemático y no pretendía explícitamente ser ninguna otra cosa, aunque de modo implícito reclamaba el derecho de filosofar, esto es, de afirmar por sí mismo lo que

tiene más o menos probabilidades de ser «real». Es muy frecuente que en la historia de la ciencia los cambios teóricos profundos dependan de algún tipo de fulcro basado en hechos, por insignificante que sea en sí mismo: las válvulas de las venas para Harvey, la relación entre unidades electrostáticas y electromagnéticas para Maxwell, el experimento Michelson-Morley (dirían algunos) para Einstein. En el caso de Copérnico no hay tal fulcro, a menos que consideremos como tal el descubrimiento basado en hechos de que el calendario juliano estaba equivocado (esto es, que la duración exacta del año tropical tiene que ser algo distinta de 365 $^{1}/_{4}$ días). Sin embargo, aunque Copérnico tenía razón al decir que los astrónomos no podían dárselas de muy competentes mientras esa cantidad siguiera sin determinar, no es el suyo un argumento del que pueda depender a su vez la cinemática del movimiento planetario. Nos encontramos ante lo que parece un ejemplo casi perfecto de un cambio de pensamiento que no va encaminado a resolver ningún problema nuevo, pero que, a pesar de ello, presenta una solución nueva.

Fue medieval por parte de Copérnico basar su obra eclécticamente en un conjunto de observaciones que se daban por buenas en lo que se refiere a exactitud y homogeneidad, muchas de ellas extraídas del propio Ptolomeo; medieval también que aspirase a mejorar la armonía del conocimiento; en la filosofía medieval había sido una tarea inacabable reconciliar la ciencia pagana con la religión cristiana, comparar pacientemente las autoridades, explicar las contradicciones y discrepancias. El objetivo externo de Copérnico era justamente una fusión semejante, en su caso de las tradiciones matemáticas y filosóficas, y de esta manera (quizá con bastante ingenuidad) construir una imagen única de la realidad. (Su objetivo interno lo consideraremos más adelante.) Ante la incongruencia entre una explicación filosófica del universo que era y probablemente seguiría siendo del todo no cuantitativa y un modelo matemático que proporcionaba predicciones y era a la vez inimaginable, disconforme con el anterior e incoherente, Copérnico prefirió el modelo matemático como punto de partida intelectual al mismo tiempo que reconocía francamente su incoherencia:

> ... en el curso de la exposición por parte de los matemáticos de lo que ellos denominan su sistema nos encontramos con que o bien han omitido algún detalle indispensable o introducido algo extraño y totalmente ajeno a la cuestión. Sin duda esto no habría sucedido

si hubieran seguido principios fijos: porque si sus hipótesis no fueran engañosas, todas las inferencias basadas en ellas podrían verificarse con confianza.[11]

Este breve pasaje expone dos argumentos importantes. En primer lugar, Copérnico rechaza implícitamente la antigua opinión expresada por Osiander en su hipotético Prefacio al Lector en el sentido de que la incoherencia de los modelos matemáticos no tenía importancia, ya que no se pretendía que reflejaran la realidad. Que Copérnico dedicase su libro al papa Pablo III sólo tiene sentido si partimos de este rechazo, que a su vez puede tener relación con el hecho de que en el siglo XIII los teólogos condenaran el argumento según el cual el universo tiene que corresponder necesariamente a los dictados de la razón filosófica, esto es, del aristotelismo.[12] Hay que reconocer que la visión aristotélica del universo era la más racional que el hombre podía idear, pero, pese a ello, Dios habría podido hacerla de otra manera, de acuerdo, por ejemplo, con los modelos de los matemáticos (de haber sido posible evitar la inconsistencia interna y otros puntos flojos de los mismos). Así, pues, un modelo matemático armonioso, perfeccionado, *podía* —según esta teología— representar tanto el designio de Dios como una explicación filosófica en apariencia más racional y, por consiguiente, tener pretensiones de realismo igualmente poderosas. Ningún griego hubiera podido seguir semejante hilo de pensamiento instrumentalista.

En segundo lugar, Copérnico dice que lo que está mal son los *principios* y no las herramientas analíticas ni los datos de los astrónomos matemáticos. La técnica de Ptolomeo, basada en su resolución de las órbitas planetarias en múltiples componentes circulares, era excelente: lo que estaba equivocado era su suposición *filosófica* de que la Tierra es el eje fijo en torno al cual gira el universo. Esto tiene que ser una suposición filosófica, pues matemáticamente, como escribe Copérnico,

un aparente cambio de lugar puede nacer del movimiento del objeto o del observador, o, asimismo, del movimiento desigual de los

11. J. F. Dobson y S. Brodetsky, *Nicolaus Copernicus, De Revolutionibus*, prefacio y libro 1, Royal Astronomical Society, Londres, 1947, p. 4.
12. Edward Grant, «Late medieval thought, Copernicus, and the scientific revolution», en *Journal of the History of Ideas*, XXIII (1962), pp. 197-220.

> dos (pues no es perceptible movimiento alguno entre lo que se mueve igual y paralelamente...). Si entonces se postula algún movimiento de la Tierra, el mismo se reflejará en los cuerpos externos, que parecerán moverse en sentido opuesto.

Así, pues, el matemático es libre de escoger su eje y el filósofo debe dejarle en libertad de escoger, toda vez que carece de autoridad para decir que Dios no podía hacer un universo con un Sol central fijo. Y, una vez el matemático se ajusta a esta libertad y se siente a sus anchas contemplando el universo de esta nueva manera, descubre que los movimientos relativos consiguientes entrañan una lógica y un orden totalmente propios:

> Si los movimientos del resto de los planetas se relacionan con la circulación de la Tierra y se consideran ajustados al orbe de cada planeta, no sólo se derivan de ello sus fenómenos (conocidos), sino que los órdenes y magnitudes de todos los cuerpos celestes y de los cielos mismos quedan tan unidos unos a otros que nada en ninguna parte de ellos podría moverse de su lugar sin producir una confusión entre todas las otras partes del Universo en conjunto.[13]

Sin duda no puede ser coincidencia que Copérnico, que había vivido en Italia al mismo tiempo que Leonardo da Vinci, utilice aquí una metáfora anatómica contrastando la perfección de la morfología montada apropiadamente con la de la astronomía geocéntrica, en donde las extremidades y los miembros del cuerpo parecían seleccionados y juntados al azar, de manera que constituían un monstruo más que un hombre, como Copérnico había escrito en la página inmediatamente precedente. Por supuesto, era natural que considerase que el microcosmos (el hombre) y el macrocosmos (el universo) eran afines y paralelos el uno al otro.

¿Cómo llegó Copérnico a ser un revolucionario de la astronomía, papel que evidentemente le molestaba, ya que se esforzó tan poco por dar a conocer sus ideas, madurándolas durante treinta años y pico y prefiriendo (como él dice) hablar de cuestiones matemáticas sólo con matemáticos? Su vida, de hecho, disfrutó de una larga preparación que fácilmente habría podido quedarse sin una realización intelectual. Copérnico casi nació en el seno de la Iglesia, ya que

13. Dobson y Brodetsky, *op. cit.*, pp. 10, 5.

desde la infancia él y su hermano Andrés fueron educados por el hermano de su madre, Lucas Watzelrode, ya que su padre (un mercader de la ciudad polaca de Toruń) había muerto. Watzelrode, a tiempo para ser obispo de Warmia, consiguió para su prometedor sobrino una canonjía en la catedral de Frauenburgo, donde pasaría cuarenta años dedicado a la administración de tierras de la Iglesia y otros asuntos. Pero mientras tanto el astrónomo, que seguiría mostrándose discretamente activo durante aquellos años, se formó en Cracovia, lugar de nacimiento de su padre. En esta ciudad, la más rica del reino y (a la sazón) capital del mismo, se había fundado en 1364 una universidad que poseía una de las mejores bibliotecas al norte de los Alpes. Allí adquirió Copérnico (como reconocería más tarde) el conocimiento y las ideas que inmortalizaron su nombre: entre 1491 y 1496, año en que se marchó a Bolonia. Tras permanecer en Italia unos cuatro años, durante los cuales siguió cultivando la astronomía además del derecho (sus estudios oficiales), Copérnico volvió brevemente a Polonia en busca de permiso para ausentarse y estudiar medicina en Italia «con el objeto de aconsejar a nuestro reverendísimo obispo y también a los miembros del capítulo». El permiso le fue concedido y esta vez escogió Padua, aunque su doctorado en derecho canónico lo recibiría en Ferrara.

Finalmente, en el verano de 1504, se afincó en Frauenburgo; contaba entonces unos treinta y tres años de edad. Transcurren varios años —evidentemente activos— antes de que se tenga constancia de que adquirió materiales para edificar una torrecilla de piedra que utilizaría para la observación. Permaneció en contacto con los matemáticos de Cracovia y en 1514 uno de éstos ya poseía un «Pequeño comentario sobre las hipótesis del movimiento celeste» postulado por un autor anónimo; sin duda se trataba de Copérnico, pues su «Pequeño comentario» (*Commentariolus*) se conserva como la primera exposición breve de sus extraordinarias ideas. Nada induce a creer que este bosquejo de seis páginas gozara de gran circulación. Al menos diez años después, en 1524, Copérnico escribió para un amigo una *Carta contra Werner*,[14] en la que criticaba la opinión publicada por Johann Werner de Nuremberg en el sentido de que la octava esfera de los cielos (la que soporta las estrellas fijas) gira con movimiento

14. Edward Rosen, *Three Copernican treatises*, Dover, Nueva York, 1959², pp. 93-106.

uniforme o precesión. En esto Werner tenía razón en principio, mientras que Copérnico se equivocaba al defender la variabilidad o reversibilidad del movimiento de la octava esfera. Ninguno de estos breves trabajos se publicó antes de la era moderna. Por lo demás, la información que tenemos sobre la reputación de Copérnico como matemático es muy limitada. Rheticus relata —debe de tener un recuerdo orgulloso de su maestro— que durante la primera estancia de Copérnico en Italia, en el curso de una visita a Roma, dio una conferencia «ante un nutrido auditorio de estudiantes y multitud de grandes hombres y expertos en esta rama del conocimiento».[15] También consta en los anales que un tal Widmanstad explicó la teoría copernicana ante el papa Clemente VII y varios cardenales en el año 1533.[16] (Pero, ¿cómo consiguió Widmanstad su información? ¿Serían en realidad el papa Pablo III y el año 1543?) Ciertamente, Georg Joachim Rheticus conocía la teoría astronómica de Copérnico lo suficiente para trasladarse de Wittenberg a Frauenburgo en 1539 con el fin de descubrir su naturaleza. Con su «primer relato» (*Narratio prima*) de lo que Copérnico había estado haciendo, publicado en 1541, el bien guardado secreto pitagórico salió a la luz, al menos en Alemania; cuando poco tiempo después se publicó el *De revolutionibus* todo el mundo empezó a hablar de Copérnico. Éste ya había muerto. Difícilmente puede esperarse que un hombre que guarda para sí su gran obra hasta cumplir los setenta años deseara defenderla enérgicamente.

¿Cuáles fueron las fuentes de Copérnico? Rheticus escribió sobre él diciendo que era un maestro no inferior a Regiomontano y añadió: «Más bien lo comparo con Ptolomeo, no porque considere a Regiomontano inferior a Ptolomeo, sino porque mi maestro comparte con Ptolomeo la buena suerte de completar, con la ayuda de la benevolencia divina, la reconstrucción de la astronomía que él había empezado»,[17] mientras que Regiomontano murió relativamente joven. Ptolomeo era para Copérnico, como, de hecho, para todos los astrónomos durante muchos siglos, la fuente definitiva de conocimiento e inspiración, pero, como el *Almagesto* o *Gran sintaxis* no se imprimió antes de 1515, Copérnico no lo conocía cuando redactó su *Commentario-*

15. *Ibid.*, p. 111.
16. Lynn Thorndike, *History of magic and experimental science*, V, Columbia U. P., Nueva York, 1941, p. 410.
17. Rosen, *Three Copernican treatises*, p. 109.

lus.[18] En la *Carta contra Werner* (1524), sin embargo, hace muchas alusiones al *Almagesto* y lo mismo hace a partir de entonces. ¿Qué leyó antes de 1515? El importante libro de Regiomontano (a quien aludió Rheticus) no apareció hasta 1496, año en que Copérnico se fue de Cracovia, aunque ciertamente lo utilizaría. Pero el libro con el que empezó (si dejamos a un lado *La esfera* de Sacrobosco, la *Teoría planetaria* medieval de Gerardo de Cremona y otros antiguos favoritos que ciertamente se leían y comentaban en Cracovia) fue las *Nuevas teorías de los planetas* (*Theoricae novae planetarum*), escrito por Georg Peurbach (1423-1461) en 1454. Este libro se imprimió por vez primera en 1474 aproximadamente; un comentario del mismo escrito por Wojciech de Brudzevo (1482) se convirtió en un texto clásico en Cracovia y Copérnico debió de estar familiarizado con él, aunque Wojciech no era su maestro. Estas *Nuevas teorías de los planetas* tenían por fin que reemplazar los resúmenes medievales y así lo hicieron, disfrutando de una vida larga y útil como libro de texto elemental que explicaba el lenguaje técnico de la astronomía y los sistemas de círculos cuyas revoluciones combinadas representaban el movimiento de cada planeta. Peurbach demostró claramente, por ejemplo, cómo en los planetas exteriores el movimiento del planeta en su epiciclo «imita» exactamente el movimiento del Sol alrededor de la Tierra (según Ptolomeo), siendo los radios siempre paralelos entre sí. Peurbach «modeló» los círculos en un sistema de esferas sólidas (que contenían huecos para los epiciclos) siguiendo el ejemplo de algunos astrónomos islámicos, y puede que Copérnico se fijara en las dificultades resultantes de ello. Los astrónomos de Cracovia —uno de los mejores centros de esta ciencia en Europa— parecen haber ido más allá de Peurbach en lo que se refiere a poner en duda las suposiciones convencionales, señalando, como, por supuesto, hicieran antes filósofos medievales mucho más conocidos como Nicolás de Oresme, que había buenos argumentos para interpretar la aparente revolución diaria de los cielos como una rotación de la tierra sobre su eje, y que el Sol no se mueve necesariamente porque parezca moverse.

18. Para más detalle: una versión medieval en latín del árabe se publicó por primera vez en Venecia en 1515. Seguramente ésta es la que utilizó Copérnico. Seguidamente, se imprimió también en Venecia, en 1528, la traducción latina de un manuscrito griego hecha (1451) por Jorge de Trebisonda: los eruditos se inclinan a tener mala opinión de ella. Luego el mismo manuscrito griego se imprimió en Basilea en 1538. Salió demasiado tarde para que Copérnico pudiera utilizarlo.

Es muy posible que Copérnico se sintiera inducido a reflexionar sobre estas cuestiones.[19]

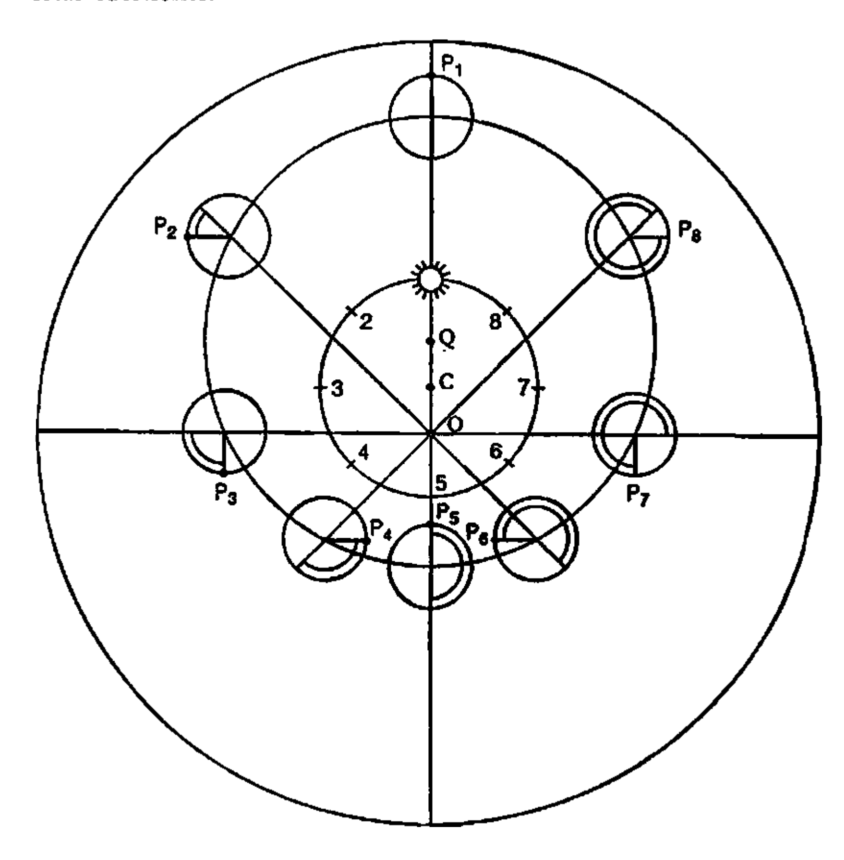


FIGURA 2.1

Cómo el movimiento de un planeta exterior en su epiciclo imita al del Sol

De Peurbach, *Nuevas teorías de los planetas.* O es la Tierra central. Cada movimiento angular del planeta de P_1 a P_2, P_3 a P_4, etcétera, coincide con un movimiento similar del Sol a las posiciones sucesivas 2, 3, 4, etcétera.

19. Paul W. Knoll en R. S. Westman, ed., *The Copernican achievement*, University of California Press, California, 1975, pp. 147-148.

Sin embargo, no es posible que aprendiera astronomía matemática de Peurbach y en este sentido debemos suponer que su primer recurso, así como la base del *Commentariolus*, sería el *Epitome* del *Almagesto* impreso en 1496, más de treinta años después de quedar terminado. Ésta fue la obra conjunta de Peurbach y Regiomontano o Johannes Müller Königsberg (1436-1476), los cuales habían unido sus fuerzas en Viena para trabajar en el manuscrito griego que el cardenal Bessarion había traído de Constantinopla (en realidad, *antes* de que esa gran ciudad cayera en poder de los turcos). Regiomontano no era sólo buen conocedor del griego —a diferencia de Peurbach, aunque, según el más joven de los dos, se sabía el *Almagesto* en latín casi de memoria—, sino que se dedicaba activamente a la observación y la publicación de textos exactos como, por ejemplo, su *Efemérides*, que daba las posiciones de los cuerpos celestes para cada día de 1475 a 1506, y que Colón llevó consigo en su cuarto viaje. También era matemático muy competente (aunque su importante obra sobre trigonometría no se imprimiría hasta 1533). El *Epitome* —que una autoridad

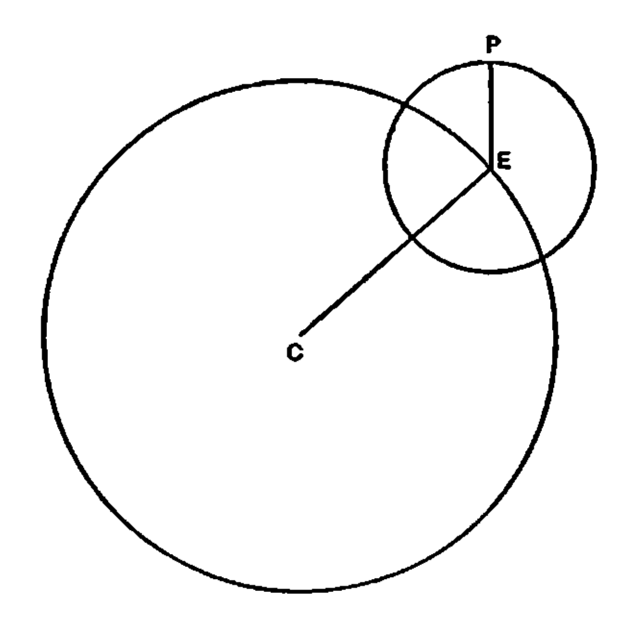


FIGURA 2.2

moderna ha calificado de «el mejor libro de texto de astronomía ptolemaica jamás escrito»—[20] pudo dar a Copérnico todo lo que necesitaba para idear su astronomía heliocéntrica y, por supuesto, Copérnico también tendría acceso a los necesarios volúmenes de tablas astronómicas.

No hace falta dar aquí muchos detalles técnicos, mas para comprender la revolución de Copérnico es esencial dar una idea general de los principios de la astronomía planetaria precopernicana. El primer factor esencial es que, si bien el sistema correspondiente a los dos planetas interiores (Mercurio y Venus) refleja el correspondiente a los tres exteriores (Marte, Júpiter, Saturno), hay una inversión de magnitudes. Así, considerando ante todo los primeros, si C es el centro del orbe principal, la sección de éste en el plano de la eclíptica representa el círculo deferente que transporte el centro E del orbe secundario o epiciclo representado por el círculo menor; a su vez, el epiciclo transporta el planeta P. Los datos más básicos que se necesitan para trazar los movimientos de Mercurio y Venus son los tamaños *relativos* de los dos círculos y los períodos de revolución (en días, pongamos por caso) de cada planeta alrededor de E y de E mismo alrededor de C. Éstos son fáciles de resumir en tablas (después de la ardua tarea de verificarlos por medio de la observación y el cálculo):

	Mercurio	*Venus*
Proporción EP/CE	3,75 : 10	7,9 : 10
Período de P	88 días	225 días
Período de E	365 ¼ días	365 ¼ días

Aquí es una necesidad práctica, aunque no lógica, del esquema el que dondequiera que los centros E estén situados en el espacio —y se les podría suponer a voluntad más cercanos que el Sol o más allá de él en cualquier orden— deben, en el caso de Mercurio y Venus, estar situados en la línea entre la Tierra y el Sol. El orden de Ptolomeo era la Tierra (O), E_M, E_V, el Sol: así, Mercurio alcanza una elongación máxima con respecto al Sol cada 44 días, y Venus cada 112 ½ días aproximadamente y luego el planeta vuelve hacia el Sol: a un lado del Sol aparece, por supuesto, como estrella vespertina (que se pone

20. Noel Swerdlow, «The *Commentariolus* of Copernicus», en *Symposium on Copernicus, Proc. Amer. Phil. Soc.*, pp. 117, 1973, 426.

después del Sol) y al otro lado como estrella matutina (que sale antes que el Sol). El período del propio Sol es obviamente 365 ¼ días.

Pasando ahora a los planetas exteriores, podemos resumir en una tabla las mismas relaciones básicas:

	Marte	*Júpiter*	*Saturno*
Proporción EP/CE	6,58 : 10	1,92 : 10	1,08 : 10
Período de P	365 ¼ días	365 ¼ días	365 ¼ días
Período de E	687 días	4.332 días	10.750 días

Basándonos en esto parece que, aunque la proporción EP/CE *aumenta* de Mercurio a Venus, *disminuye* otra vez de Venus hacia fuera, siendo los dos epiciclos más exteriores bastante pequeños en comparación con sus deferentes. Además, todos los epiciclos exteriores tienen el mismo período que el Sol, del mismo modo que el deferente de los planetas inferiores y, como ya se ha apuntado, el radio EP tiene que ser siempre paralelo a la línea que une el Sol y la Tierra. Así, el Sol aparece misteriosamente en ambos sistemas, pero de maneras distintas.

Hay que señalar una complicación más. Al igual que sus predecesores, Ptolomeo se encontró con que para ajustarse a las observaciones tenía que hacer que el centro del epiciclo E pareciese en cada caso (tal como se ve desde la Tierra central) que se movía a velocidades que cambiaban regularmente en su orbe; el ajuste más exacto se obtuvo por medio de una maniobra bastante compleja: la Tierra (O) se situó en el diámetro axial del orbe (AB) un poco hacia un lado del centro (C), al mismo tiempo que como centro de la rotación uniforme de E se tomaba otro punto (Q) a una distancia del C igual que aquella pero en el lado opuesto; esto es, el ángulo EQB varía uniformemente al moverse E alrededor del círculo. Por consiguiente, la velocidad periférica de E es en realidad más grande cerca de A que cerca de B, mientras que la mayor proximidad de O a A que a B contribuye a hacer que E cerca de A (perigeo) parezca moverse más aprisa que cerca de B (apogeo), tal como se ve desde O. La excentricidad OQ «partida en dos» de esta manera (dividiéndola entre OC y CQ) nunca es muy grande para ninguno de los planetas, de modo que el cambio de distancia del centro epicíclico E no entraba en la teoría, que se ocupaba totalmente de posiciones angulares y movimientos.

A juicio de Copérnico, este tratamiento matemático era insatis-

factorio por diversas razones, aunque inicialmente en el *Commentariolus* insistió en una sola:

> ... parecía —escribió— bastante dudoso, pues estas teorías eran inadecuadas a menos que considerasen también ciertos círculos ecuantes, a causa de los cuales resultaría que el planeta nunca se mueve con velocidad uniforme ya sea en su esfera deferente o con respecto a su propio centro. Por lo tanto, una teoría de esa clase no parecía ni lo bastante perfecta ni suficientemente de acuerdo con la razón.[21]

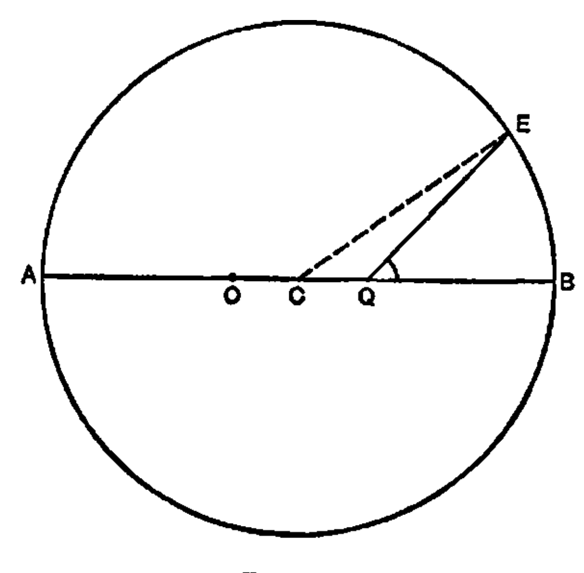


FIGURA 2.3

La dificultad de Copérnico es obvia. Si E es transportado sobre una esfera sólida, real, cuyo centro es C, entonces el movimiento uniforme de esa esfera supone que E debe moverse uniformemente alrededor de C mismo, no de un punto ecuante como Q. Si la rotación alrededor de Q fuera uniforme, entonces la esfera en conjunto debería reducir la velocidad durante una mitad de cada revolución y acelerarla

21. *Ibid.*, p. 434.

durante la otra mitad, proceso éste jamás concebido en astronomía. Geométricamente, la rotación uniforme de E en torno a Q es fácilmente concebible, pero en términos de esferas mecánicas es imposible. Y Copérnico, está claro, prestaba mucha atención a construcciones mecánicas como las de Peurbach: como dijo en *De revolutionibus*, un movimiento circular debe ser uniforme pues tiene una causa de movimiento que nunca falla, que es el sistema mismo.[22] En esta obra de madurez también alega otros defectos de índole parecida en el tratamiento ortodoxo del movimiento planetario; no hay en ella ninguna explicación de por qué el enorme epiciclo de Venus ocupa un volumen desproporcionadamente grande, ni se argumenta de manera suficiente la posición del Sol entre Mercurio y Venus, y los otros tres planetas. «¿Qué causa pueden aducir aquellos que sitúan a Venus más cerca que el Sol, y Mercurio seguidamente, o algún otro orden?» ¿Por qué los planetas inferiores, al igual que los superiores, no iban a estar completamente despegados del Sol?:

> En tal caso, o bien la Tierra no puede ser el centro con el que están relacionados el orden de los planetas y sus órbitas, o ciertamente no se observa su orden relativo, ni aparece por qué debería asignarse a Saturno una posición más elevada que a Júpiter, o a cualquier otro planeta.[23]

Dicho de otro modo, el orden acostumbrado de los cinco planetas con el Sol en medio era un mero convencionalismo; nada ataba definidamente los seis sistemas de círculos en un orden lógicamente coherente. Por lo tanto, Copérnico puede argüir que al menos sería un paso hacia una coherencia mayor hacer que Mercurio y Venus circulasen alrededor del Sol (como, de hecho, se había propuesto mucho antes); nada se pierde a causa de esta simplificación salvo la idea de que cada planeta tiene un orbe deferente independiente que rodea a la Tierra.

Hecho esto, vemos inmediatamente que se establece una proporción entre los orbes «epicíclicos» de Mercurio y Venus que tienen al Sol como su centro y el orbe del propio Sol, toda vez que podemos medir la elongación máxima de estos dos planetas respecto del Sol. Supongamos ahora que en busca de una sencillez todavía mayor —y

22. Dobson y Brodetsky, *op. cit.* (en nota 11), p. 15.
23. *Ibid.*, p. 17.

Copérnico tiene en cuenta esta posibilidad también— invirtiéramos los círculos correspondientes a los planetas exteriores, haciendo del orbe del Sol el orbe deferente para cada uno de estos tres (como ya lo hemos hecho para Mercurio y Venus), de tal manera que el «epiciclo» de cada planeta tenga el Sol en su centro, y estos «epiciclos» respectivamente los períodos de 687 días (Marte), 4.332 días (Júpiter) y 10.750 días (Saturno) ya encontrados. Visto desde la Tierra, el movimiento de cada planeta será el mismo de antes. Ahora, sin em-

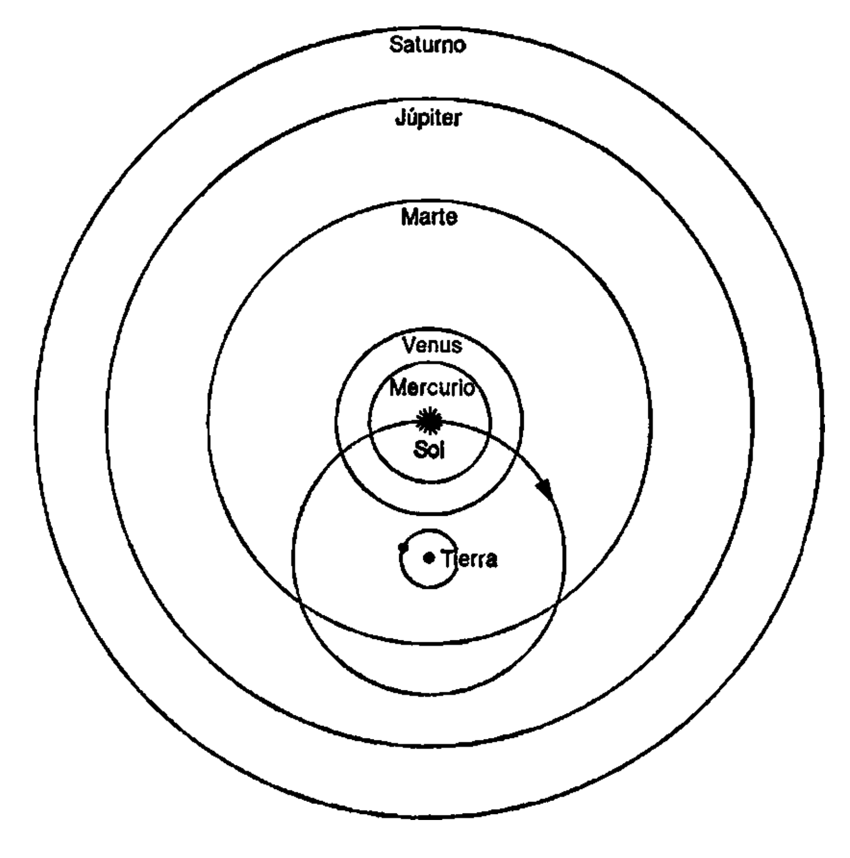


FIGURA 2.4

El sistema geoheliocéntrico, con la Tierra fija

bargo, la dimensión de cada uno de estos tres «epiciclos» planetarios exteriores se ha hecho proporcional al tamaño del orbe del Sol, como antes en el caso de Mercurio y Venus. Podemos calcular —como sin duda hizo Copérnico— una secuencia de distancias planetarias desde el Sol (poniendo como 10 la distancia entre la Tierra y el Sol):

Mercurio	3,75	Marte	15,2
Venus	7,19	Júpiter	52,1
(Sol	10,00)	Saturno	92,6

Las distancias entre los diversos cuerpos celestes (incluyendo la Luna, como es natural) están ahora definitivamente fijadas, hecho que puede parecernos convincente, como se lo pareció a Kepler.

Este no es aún el sistema heliocéntrico de Copérnico, más bien suele denominársele el sistema geoheliocéntrico; muchos años más tarde quedaría vinculado para siempre al nombre del astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601). Tampoco, aunque Copérnico era muy consciente de la fijación de las dimensiones —verdadera tanto en el sistema geoheliocéntrico como en el heliocéntrico al que él llegaría— insistió mucho en ello, quizá porque lo mismo ocurre en uno que en el otro. A decir verdad, el sistema geoheliocéntrico tiene todas las ventajas de orden que Copérnico reclamaba para su propio sistema, pero poseía (a ojos de Copérnico) una desventaja abrumadora: es imposible trazarlo con esferas sólidas, ya que éstas deberían cortarse mutuamente.

¿Qué pudo llevar a Copérnico a explorar sistemas diferentes de los de Ptolomeo, evitando los ilógicos círculos ecuantes? Si nos fiamos exclusivamente de su propia explicación, buscó inspiración en los escritos de otros autores antiguos además de Aristóteles y Ptolomeo, «para averiguar si alguno de ellos había supuesto alguna vez que los movimientos de las esferas eran otros que los exigidos por las escuelas matemáticas». Y, de hecho, en Plutarco —a quien Copérnico podría haber recurrido a causa de su conocido ensayo *Sobre la cara de la Luna*— encontró alusiones a los pitagóricos del siglo v como Filolao y Heráclides que habían supuesto que la Tierra se movía. «Sacando partido de esto, también yo empecé a pensar en la movilidad de la Tierra; y aunque la opinión parecía absurda... consideré que fácilmente podía permitírseme comprobar, suponiendo algunos movimientos de la Tierra, si también podían descubrirse explicaciones más

satisfactorias [que las de los matemáticos griegos] de la revolución de las esferas celestes».[24] Lo que Copérnico *no* dijo a sus lectores, quizá porque sabía que la historia tenía asociaciones desagradables, fue que (como Plutarco también relató basándose en la autoridad de Arquímedes) Aristarco de Samos había ideado un sistema matemático, yendo así mucho más lejos que los pitagóricos, en el cual a la Tierra se la trataba como planeta. Es muy posible que creyese que este problema había sido resuelto en la antigüedad, pero que la solución de Aristarco fuera arrinconada a causa de los prejuicios: sabemos esto por un pasaje que fue eliminado del manuscrito durante los cambios que el propio Copérnico hizo más adelante cuando preparaba la edición.

Es muy posible que así fuera. No hay por qué dudar de una historia que Copérnico cuenta de modo tan circunstancial. Pero Plutarco no hubiera podido indicar *matemáticamente* a Copérnico el camino que conducía a un sistema heliocéntrico. En este sentido, como ha señalado Noel Swerdlow, puede que fuese crucial una indicación que contiene el *Epítome* (1496) de Regiomontano y que difícilmente podía escapar a la atención de Copérnico.[25] En el libro XII de su obra Regiomontano mostró cómo los movimientos de los planetas, tanto inferiores como superiores, podían representarse, no por medio de los deferentes y los epiciclos de Ptolomeo, sino mediante un círculo excéntrico cuyo centro está situado en el radio solar y gira con él alrededor de la Tierra en el centro del universo. Es decir, las dos figuras que vienen a continuación son cinemáticamente equivalentes, como indican las líneas de puntitos: dicho de otro modo, hacer que un círculo grande se mueva alrededor de otro pequeño es lo mismo que hacer que un círculo pequeño se mueva alrededor de uno grande, *excepto* (y esto es lo importante) que ahora los círculos «pequeños» correspondientes a la totalidad de los cinco planetas —en realidad, para Mercurio y Venus serán más grandes que los círculos excéntricos u orbitales— tienen el mismo período que el Sol. Por otra parte, es obvio, aunque Regiomontano no lo dijo explícitamente, que los círculos «grandes» que corresponden a los cinco planetas pueden tener el mismo centro y que éste puede ser el Sol. Si se hace esa elección, entonces terminamos con el sistema geoheliocéntrico que ya hemos descrito.

24. *Ibid.*, p. 5.
25. Swerdlow, *loc. cit.* (en nota 20), pp. 471-477.

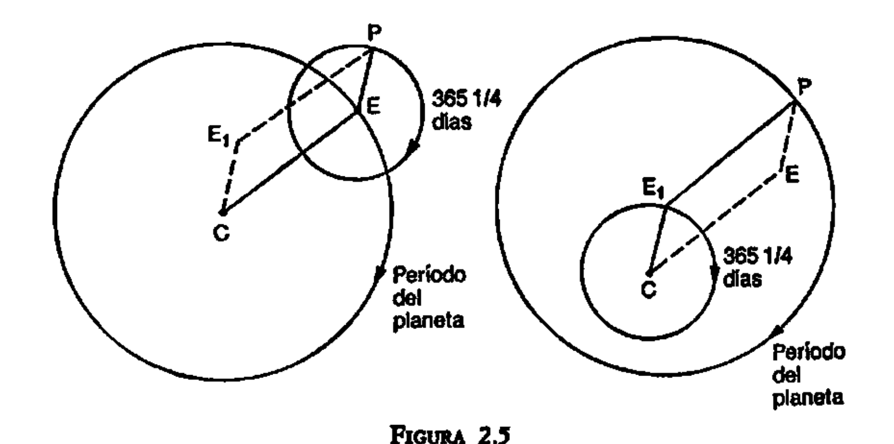


FIGURA 2.5

La equivalencia de Regiomontano

Swerdlow ha presentado pruebas de que Copérnico siguió este rumbo, pero, inevitablemente, Copérnico no pudo pararse en el modelo geoheliocéntrico porque éste sólo funciona para los círculos y no para las esferas. Porque algunos de los orbes alrededor del Sol se cruzan con el orbe del Sol alrededor de la Tierra. Dado que Copérnico aceptaba la realidad de las esferas celestes, único aparato que él conocía por medio del cual los planetas podían transportarse a través del espacio, tuvo que ir más allá de la geoheliocentricidad hasta llegar al verdadero sistema heliocéntrico,[26] pues, haciendo que el centro del movimiento fuera el Sol en vez de la Tierra, y situando la Tierra en el orbe del Sol, desaparecen todas las intersecciones y puede construirse un modelo esférico.

Sin embargo, aún quedaba una dificultad grave antes de que Copérnico pudiera darse por satisfecho: la del punto ecuante. ¿De qué manera debían disponerse los movimientos de esferas de revolución uniforme para que dieran los mismos efectos que las esferas

26. En rigor, el sistema copernicano no es heliocéntrico por cuanto para Copérnico el centro de todo el sistema no es el Sol, sino el centro de la órbita de la Tierra (próxima al Sol y moviéndose a su alrededor). Tampoco, en rigor, son heliocéntricos los sistemas kepleriano y newtoniano. El término exacto pero pedante «heliostático» (aparte de su infortunado parecido a *helióstato*, que es algo completamente distinto) no evoca con igual fidelidad el entusiasta ejemplo del propio Copérnico de que el Sol se hallaba en el centro del universo.

de Ptolomeo, las cuales, como hemos visto, tenían que moverse de modo no uniforme? La respuesta era sencilla: añadir más esferas al sistema. En el *Commentariolus* añadió a la esfera orbital concéntrica de cada planeta un epiciclo primario, luego a éste le añadió un epiciclo secundario que se movía al doble de velocidad. En el caso de Júpiter el radio del concéntrico es de 52.166 unidades; el del epiciclo primario, de 4.040 unidades; y el del epiciclo secundario, de 1.347 unidades, siendo el radio del orbe de la Tierra de 10.000 unidades. De hecho, en cada caso el epiciclo secundario era únicamente un tercio del tamaño del primario. No obstante, en su libro de madurez, para los tres planetas exteriores Copérnico prefirió un sistema equivalente, haciendo que el círculo deferente fuera excéntrico respecto del Sol con sólo un epiciclo del mismo tamaño que el anterior epiciclo secundario; la excentricidad era igual al radio del anterior epiciclo primario. Copérnico dijo que hacía esto porque ahora pensaba que la excentricidad de los orbes era variable. Puede mostrarse fácilmente que cualquiera de estos artificios equivale a la bisección de la excentricidad por parte del Ptolomeo.

Desde hace unos veinticinco años se sabe que la geometría del *Commentariolus* correspondiente a los movimientos de Marte, Júpiter

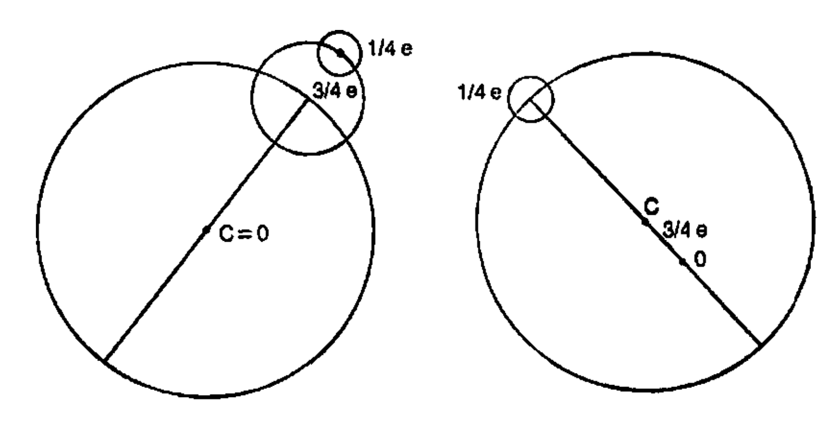


FIGURA 2.6

Los sistemas alternativos de Copérnico: izquierda, Commentariolus*; derecha,* De Revolutionibus

y Saturno no fue Copérnico el primero en proponerla, sino Alí ibn Ibrahim al-Shatir (*c.* 1305-1375) de Damasco, quien la ideó justamente por la misma razón, para hacer posible un conjunto esférico realista. Algunos de los parámetros empleados por Ibn al-Shatir son también idénticos a los utilizados por Copérnico, posiblemente porque ambos están calculados partiendo del mismo origen ptolemaico: algunos son distintos porque Copérnico hizo un cálculo independiente. También es curioso que en cada detalle de su teoría lunar Copérnico repitiera lo que Ibn al-Shatir había hecho antes; en otras partes utiliza dos círculos rodantes para producir un movimiento en línea recta como hiciera otro astrónomo islámico, Nasir al-Din al-Tusi. Por qué existía esta estrecha correspondencia entre los reformadores de Ptolomeo en Oriente y Occidente es difícil de entender: por supuesto, no abarcó el principo heliocéntrico. Sin duda Copérnico no leía árabe ni persa; no obstante, en el diagrama de los dos círculos rodantes para el *De revolutionibus* Copérnico empleó exactamente las mismas letras, punto por punto, que en la correspondiente figura allí donde aparece en manuscritos del *Tadhkira*, de al-Tusi, tratado de astronomía que (al parecer) en aquel tiempo podía encontrarse en Italia.[27] Además, Copérnico nunca explicó por qué los dos epiciclos del *Commentariolus* y el único del *De revolutionibus* tienen que ser de las proporciones dadas para que la equivalencia ptolemaica resulte.[28]

La última figura también aclara un detalle divertido. Copérnico afirmó acertadamente que en su sistema todas las esferas se movían uniformemente y que, por ende, había abolido el círculo ecuante; pero no es verdad (como acabamos de ver) que aboliera el *punto* ecuante. De hecho, hay, y tiene que haber para la equivalencia y la correspondencia con las observaciones, movimiento uniforme alrededor de un «foco vacío», Q (figura 2.7). Todo lo demás es extenderse en detalles. Pero sigue siendo válida la afirmación de Copérnico en el sentido de que su sistema de esferas puede construirse mecánicamente y, por ende, es «real».

Podemos ver, pues, que Copérnico no era ni mucho menos un genio aislado, totalmente independiente, como en otros tiempos se

27. Willy Hartner, «Copernicus, the man and his work», en *op. cit.* (en nota 20), p. 421.
28. Swerdlow, *loc. cit.* (en nota 20), p. 469.

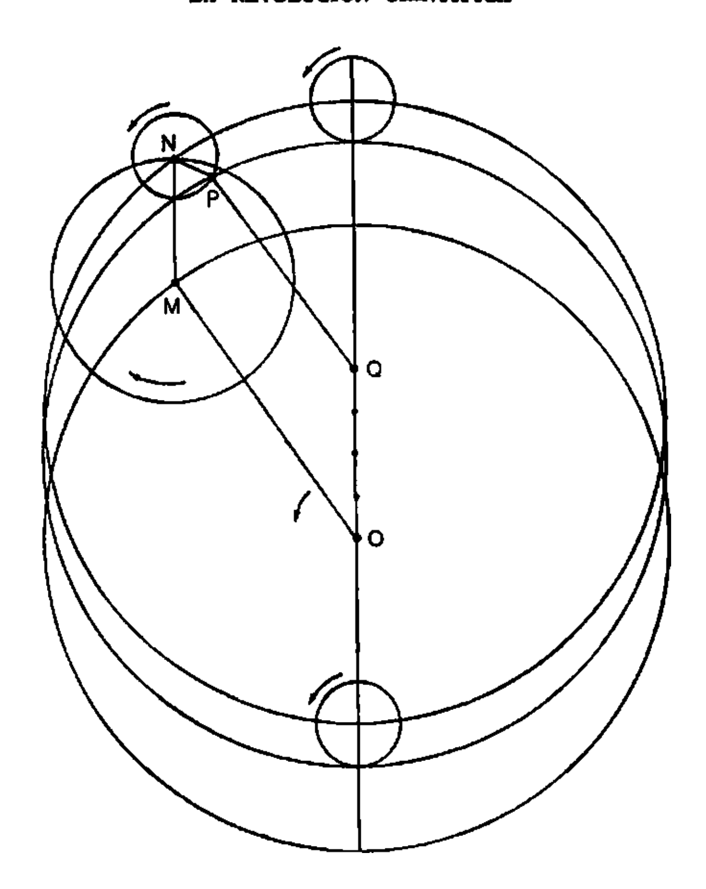


FIGURA 2.7

El círculo de en medio es el deferente excéntrico ptolemaico, con la Tierra (o el Sol para Copérnico: todo es lo mismo) en O. El planeta está en P, girando uniformemente alrededor del punto-ecuante Q. El círculo más bajo de la figura, dibujado alrededor de O, representa el deferente del *Commentariolus*; el punto M, el centro del epiciclo primario, gira uniformemente alrededor de O, N, el centro del epiciclo secundario, se mueve uniformemente y a la misma velocidad pero en sentido contrario a M, de modo que MN siempre es paralela a la línea-ápside OQ. El planeta P es transportado por el epiciclo secundario alrededor de N al doble de la velocidad angular de M y en la misma dirección. El círculo dibujado a través de los centros de los epiciclos pequeños es el deferente del *De Revolutionibus*. Se verá que estas tres construcciones son casi equivalentes; de hecho, la «órbita» de Copérnico para P no es exactamente circular: puede demostrarse que MO y PQ son necesariamente casi paralelas, de aquí que P se mueva siempre uniformemente alrededor de Q, como requería Ptolomeo.

le suponía. Fue adiestrado concienzudamente por expertos en astronomía ptolemaica, tanto en Cracovia como en Italia, los cuales, al parecer, estaban lo bastante libres de dogmatismo para hacerle ver la naturaleza verdadera de los problemas técnicos que surgían al tratar los movimientos de los cuerpos celestes, y comprender que podían examinarse soluciones de dichos problemas distintas de las que propuso el propio Ptolomeo. Por otra parte, puede que Copérnico sacara ejemplos e inspiración de los estudios de los astrónomos persas del siglo anterior; aunque no hay pruebas irrefutables de que así fuera, ahora parece más probable que improbable. Todo esto está relacionado con el análisis matemático que efectuó Copérnico, el aspecto de su labor que cierto número de historiadores ya han calificado de «conservador» en el sentido de que Copérnico siguió haciendo juegos malabares con círculos arbitrarios que él ajustaba a su antojo para que encajasen en las observaciones antiguas y sin molestarse por la trayectoria real o resultante que los cuerpos celestes describían en el espacio. Como más adelante señalaría Galileo, por ejemplo, si Venus hubiera sido una estrella con luz propia (como seguramente suponía Copérnico), las grandes variaciones en su distancia de la Tierra postuladas por Copérnico no hubiesen sido confirmadas en absoluto por la constancia relativa de su brillo visto desde la Tierra. Tampoco explicó Copérnico la anomalía de que el centro del orbe de la Tierra fuese el centro de todo el sistema; mientras que en otras cuestiones —como, por ejemplo, al atribuir una variación en el ritmo de la precesión de los equinoccios, así como un tercer movimiento a la Tierra que era necesario sólo a causa de la fijación de su eje en su esfera imaginaria— Copérnico estaba a la vez anticuado y equivocado.

En cambio, al proponer su gran idea de que el Sol era fijo y la Tierra era un planeta, lo cual en realidad no tiene nada que ver con la astronomía técnica, ya que un universo heliocéntrico y un universo geocéntrico siempre pueden hacerse equivalentes mediante la misma clase de recursos, Copérnico se mostró original e independiente. Su pretensión implícita de que no había tenido precursores desde la antigüedad es muy justa y podemos dudar de que alguno de ellos, incluso Aristarco, resolviese alguna vez el principio heliocéntrico de un modo técnicamente tan completo como el propio Copérnico. No podemos saber a ciencia cierta si partió de la viabilidad técnica de un universo heliocéntrico y luego se convenció a sí mismo de su elegancia física o si, partiendo del principio de Pitágoras, descubrió

su viabilidad técnica (como él mismo parece indicar). En cualquier caso, no parece que la filosofía platónica o la obsesión por el Sol tuvieran mucho que ver con el rumbo de su pensamiento.

Bien sabría Copérnico que, aun cuando la astronomía técnica podía asimilar perfectamente la idea de la Tierra como planeta y, a su juicio, sacar ventajas de ella, no podía decirse lo mismo de la filosofía ni de la religión. En el caso de esta última, Copérnico pidió en su Prefacio la protección del papa Pablo III contra los calumniadores, los aduladores y los charlatanes, incluyendo aquellos que podían «reclamar el derecho de emitir un juicio crítico sobre mi labor, en virtud de cierto pasaje de las Escrituras vilmente tergiversado para sus fines». También alude a que sabía que algunos cristianos primitivos, como Lactancio, albergaban ideas muy absurdas sobre el universo. Y eso es todo lo que tiene que decir acerca del problema de la elección entre la verdad revelada y la verdad racional, ese problema que ha suscitado tanto interés durante tantos siglos. De hecho, aparte de la alusión en los *Proverbios* a que Dios «asentó los cimientos de la Tierra», a que ésta no se moverá, numerosos pasajes (por ejemplo la crónica del milagro de Josué en Jericó) hacen perfectamente explícita la suposición universal de los autores bíblicos, así como de los primeros Padres, de que la Tierra se encuentra en el centro del universo, como, desde luego, también creían los filósofos y matemáticos paganos. Como afirmación bíblica referente al mundo observable, esto era tan conocido y tan concreto como la creación del mundo por Dios en seis días, la aparición del arco iris (desconocido en el mundo antediluviano) como señal del fin del Diluvio universal, o la estrella milagrosa de Belén; a pesar del tacto de Copérnico y de su escasa disposición a hablar del asunto, éste seguiría siendo real y espinoso.

El argumento filosófico se había debatido extensamente en el siglo XIV, seguramente sin que Copérnico lo supiera. Nicolás de Oresme (1320-1382) en los comentarios en francés al *De caelo* de Aristóteles que escribió hacia el final de su vida arguyó que lo mismo da que los cielos se muevan y la Tierra permanezca quieta o viceversa;[29] además, según dijo, ni los experimentos ni los razo-

29. El *Livre du ciel et du monde* fue editado por A. D. Menuet y A. J. Denomy en *Medieval Studies*, IV (1943); edición revisada, University of Wisconsin Press, Madison, 1968.

namientos podían demostrar cuál de las dos cosas era cierta. Galileo diría lo mismo doscientos cincuenta años después. Oresme cita tres argumentos contrarios al sistema copernicano. En primer lugar, vemos realmente al Sol y las estrellas describiendo una curva a nuestro alrededor; en segundo lugar, si la Tierra girase de oeste a este (en vez de girar el cielo de este a oeste), se sentiría un fuerte viento soplando ininterrumpidamente desde el este; en tercer lugar, una piedra arrojada verticalmente hacia arriba no descendería sobre el mismo punto, lo cual se debería al movimiento de la Tierra. Oresme tiene respuestas para todos estos argumentos. Empieza recalcando (como haría Copérnico) la relatividad subjetiva del movimiento: un hombre que está en una barca y contempla una segunda barca no puede distinguir fácilmente cuál de las dos se mueve, cree encontrarse detenido en su propio y pequeño mundo. En cuanto al viento, la verdad es que la Tierra, el agua y el aire del mundo sublunar se moverían juntos y, por consiguiente, no habría más vientos que aquellos a los que estamos acostumbrados (hasta mucho después no se vincularían los vientos alisios regulares con la rotación de la Tierra). La dificultad acerca de la piedra que se arroja al aire y luego cae la resolvió Oresme de forma parecida: la piedra que se mueve a través del aire es transportada con el aire y con «toda la masa de la parte inferior del mundo que se mueve con movimiento diario». Esto, al parecer, significa que la piedra se mueve junto con la Tierra que tiene debajo, y todo lo demás, aunque moviéndose libremente en el espacio del aire.

Oresme también respondió a la afirmación de que el movimiento de la Tierra estaría fuera de lugar en la textura de la filosofía natural, arguyendo que, si bien Aristóteles no había atribuido movimiento al elemento Tierra en conjunto, sí había declarado que un solo movimiento sencillo era apropiado a cada elemento, de tal manera que la Tierra elemental —y es de suponer que también el agua— bien podía girar en su lugar, como los cielos giran en los suyos, y el elemento fuego debajo de los cielos. Oresme se mostró de acuerdo en que si la Tierra se mueve, tiene que estar dotada de una «virtud que la mueve», pero esto (afirmó) ya debe poseerlo, pues los trozos de tierra arrancados de la Tierra vuelven a ella. A la objeción de que el movimiento de la Tierra falsearía la astrología replicó que todas las conjunciones, oposiciones y acontecimientos zodiacales que son significativos en astrología seguirían viéndose como ahora, las tablas

de movimientos y las teorías de la influencia celestial seguirían siendo «ciertas» sin cambio, y la única diferencia sería que la realidad del movimiento se retira de los cielos para darlo a la Tierra. En contra de Oresme y de la mayoría de los primeros copernicanos, con frecuencia se ha alegado que Copérnico eliminó la base científica que cabe suponer que posee la astrología. No fue así, pues, a decir verdad, los argumentos de la astrología parten de las configuraciones aparentes del cielo, y no de la mecánica que las produce ni de su naturaleza física. Las constelaciones son puramente artificiales y las «Casas» del zodíaco, tan importantes en la astrología, ya ni siquiera corresponden a éstas. Pero los astrónomos más doctos, como el propio Kepler, no han pensado que esto afectase adversamente a la astrología.

Aunque el milagro de Josué no desconcertó a Oresme, finalmente éste afirmó que, prescindiendo de los argumentos de los filósofos, podemos estar seguros de que la Tierra no se mueve, ya que así lo afirman las Escrituras. Además, los comentarios de Oresme parecen estar limitados a la rotación axial de la Tierra, toda vez que él no contaba con una revolución progresiva del globo alrededor del Sol; los argumentos son los mismos en ambos casos. Concebir este movimiento anual o planetario fue lo más original que hizo Copérnico y este movimiento repugnaba de manera especial a quienes creían que Dios había dado a la Tierra una posición especial en el centro del universo (con, curiosamente, el Infierno dentro de ella). Así, pues, Copérnico tenía una necesidad aún mayor de argumentos convincentes que Oresme, quien, después de todo, no hacía más que proponer una postura filosófica que finalmente abandonaría sin peligro, mientras que Copérnico exponía un argumento filosófico más débil que el de Oresme.

Primero nos dice que la Tierra es una esfera y que la rotación es natural en una esfera, pues por el mismo hecho de girar se expresa su forma. Aunque esto puede (o no) ser verdad en el caso de las planetarias, ciertamente no es aplicable a todas las esferas. Seguidamente Copérnico arguye que «un cuerpo celeste sencillo no puede moverse irregularmente en un orbe sencillo»: ésta es una de sus afirmaciones contra los ecuantes de Ptolomeo, a la vez justificando y justificada por la resolución convencional en movimientos esféricos uniformes. Luego nos recuerda, sabiamente, que cuando vemos movimientos aparentemente en los cielos debemos cuidar de no atribuirles lo que en realidad está ocurriendo en la Tierra: dado que la bóveda

celeste contiene todas las cosas, ¿no debería atribuirse el movimiento al contenido? Y, ¿no debería sorprendernos más que el universo inmenso girase en veinticuatro horas que quien así lo hiciera fuese la pequeña Tierra? Aquí Copérnico parece olvidar que si realmente hay esferas celestes, y si realmente éstas se mueven, la cuestión de «más lento» o «más rápido» en términos humanos poco significado puede tener. Debido a que las variaciones de los movimientos de los planetas indican que éstos no tienen a la Tierra como centro geométrico, «es justificable afirmar que la Tierra tiene otro movimiento además del diurno». En rigor, esto es una incongruencia; sin embargo, Copérnico procede a mostrarnos correctamente de qué manera, si los cielos son inmensurables en comparación con la Tierra, un movimiento anual de ésta no se vería revelado por una rotación aparente opuesta de las estrellas fijas a lo largo del año: «así, la Tierra aparece como un simple punto comparada con los cielos, como una cosa finita ante el infinito». (Puede que Copérnico leyera este argumento en Plutarco al comentar éste la utilización por Arquímedes del universo «inmensurable» de Aristarco en *El arenario*). En cuanto a los temores de Ptolomeo de que el movimiento de la Tierra causara inestabilidad destructiva en todo lo que hay en ella, Copérnico replica que el movimiento de la Tierra es natural, «una cosa muy distinta de una acción artificial», y que los procesos naturales transcurren sin contratiempo. Sugiere que cabría argüir igualmente que la esfera estrellada resultaría rota por su asombrosa revolución en veinticuatro horas.[30]

Al igual que Oresme, Copérnico trata la atmósfera como parte de la Tierra, una parte que gira junto con ella. Pero los cuerpos pesados que caen y los cuerpos ligeros que suben a través de la atmósfera deben tener un movimiento doble y no el movimiento único que Aristóteles juzgaba apropiado: porque, al modo de ver de Copérnico, la piedra que cae tiene que girar con la Tierra, ya que desciende en línea recta hacia el centro. Aquí nos brinda una generalización interesante: los cuerpos sencillos en su lugar y estando naturales sólo se mueven en círculos, pues este movimiento es independiente y «parecido a estar en reposo». Sólo cuando un cuerpo está fuera de su lugar natural se produce movimiento rectilíneo (o más bien, debería haber dicho, parece producirse) como en el caso de la

30. Dobson y Brodetsky, *op. cit.* (en nota 11), pp. 9-13.

piedra que cae; y estos movimientos rectilíneos forzados nunca son uniformes, mientras que sí es uniforme el movimiento circular natural de todas las cosas. El movimiento circular, acaba de decir, es como el reposo y él prefiere el reposo o la inmovilidad al movimiento, porque «la inmovilidad es más noble y más divina que el cambio y la inconstancia, los cuales son, pues, más apropiados para la Tierra que para el universo (entero)». Parece que hay cierta imperfección en el argumento aquí, puesto que el planeta Tierra se comporta como planeta no menos perfectamente que otros planetas: el cambio y la inconstancia sólo tienen relación con las partes desplazadas, participando del movimiento rectilíneo (aparente). No tiene nada que ver con la cuestión de si la Tierra es o no es un planeta.[31]

No obstante, Copérnico pronto lleva a cabo una innovación filosófica importantísima con el fin de hacer frente a la dificultad de que, como todas las cosas pesadas que hay en el universo (según Aristóteles) —esto es, la tierra y el agua— ya no se reúnen en su centro, no puede decirse que dichas cosas caigan hacia este centro por ser éste su lugar natural. En vez de ello, Copérnico propone que el peso o la gravedad —que nosotros percibimos como la causa de la caída— es sencillamente un principio de coherencia, «una inclinación natural otorgada por el Creador a las partes de los cuerpos con el fin de combinar las partes en la forma de una esfera y contribuir así a su unidad y a su integridad». Además, como todos los cuerpos del sistema solar son esferas, es plausible que también ellos tuvieran una propiedad parecida de coherencia o gravedad.[32] Dudo que Copérnico calculase todas las consecuencias de esta sugerencia de gran alcance, entre las que se cuenta la posibilidad de considerar que todos los planetas y la Luna (y, de hecho, también el Sol) son físicamente parecidos, y que la coherencia/gravedad es una propiedad universal de la materia. No transcurriría mucho tiempo antes de que alguien señalase que algo de la misma índole hace que las gotitas de líquido se unan para formar esferas.

Pero finalmente, la esencia del argumento del sistema de Copérnico la encontramos en el capítulo 10 de su libro 1: «Sobre el orden de los cuerpos celestes», pues donde sobresale el sistema heliocéntrico es en la fijación de la serie de planetas y sus distancias. Sin

31. *Ibid.*, pp. 14-145.
32. *Ibid.*, pp. 15-16.

embargo, puede que esto tenga tanto de preferencia estética como de argumento filosófico. También aquí nos habla Copérnico de la gloria del Sol entronizado en el centro:

> Con justicia se le llama la Lámpara, la Mente, el Gobernante del Universo; Hermes Trimegisto le llama el Dios Visible, la Electra de Sófocles le llama el Omnividente. Así se encuentra el Sol sentado en un trono real gobernando a sus hijos los planetas que giran a su alrededor.

En el único pasaje poético del *De revolutionibus* parece que Copérnico se deja llevar momentáneamente por la armonización de sus ideas con las ideas (muy distintas) del mito y la sabiduría antiguos: cabría preguntarse qué tenía que ver la *Electra* de Sófocles con el cálculo de la duración del año tropical. En todo caso, Copérnico vuelve en seguida, con énfasis renovado, a la simetría geométrica de su sistema, y al «claro lazo de armonía en el movimiento y la magnitud de los orbes como no puede descubrirse de ninguna otra manera». Tampoco deja de insistir en el principio de economía —el denominado «navaja de Ockham»—: «Así más bien seguimos la naturaleza, que, no produciendo nada vano o superfluo, con frecuencia elige dotar a una causa de muchos efectos». E incluso aquí, con las que son virtualmente sus últimas palabras sobre la corrección o el error del método que había escogido, confiesa honradamente que, después de todo, debe dirigirse a los técnicamente expertos. «Aunque estos puntos de vista (míos) son difíciles, contrarios a las expectativas, y ciertamente insólitos, en la continuación haremos, si Dios lo permite, que queden sobradamente claros, al menos para los matemáticos.»

¿Qué pensó Copérnico cuando recibió en su lecho de muerte (según dicen) los ejemplares del libro que había estado puliendo durante tantos años? ¿Pensó en su posible recepción por matemáticos y eruditos y se preguntó si lo utilizarían o lo olvidarían? Ciertamente, no pudo imaginar que, visto con perspectiva histórica, este libro más que cualquier otro parecería haber introducido una nueva época en la historia.

Capítulo 3

UN SIGLO DE CONFUSIÓN

Cuando se publicaron las obras maestras de Copérnico y Vesalio el proceso de renacimiento científico y artístico duraba desde hacía más de un siglo y la producción de dichos autores debería considerarse como fruto maduro del mismo en vez de como algo perteneciente a sus comienzos. También la imprenta contaba casi cien años de edad y había vertido abundancia de conocimientos en el mundo; la gente incluso iba acostumbrándose a la idea de que existían las Américas y a aprender los nombres de los extraños animales y plantas que había en ellas. Lo griego ya no era una cosa muy rara y el nombre de Platón empezaba a resultar casi tan conocido como el de Aristóteles. El patronazgo de la corte ya no se disfrutaba únicamente en Italia, pues el ejemplo del amor a la cultura lo habían imitado en Francia e Inglaterra y hacía progresos en Alemania, donde un príncipe se dedicaba a la astronomía. Pero aún no existía ningún programa definible de trabajo, ninguna frontera identificable de conocimiento en avance constante. Había entusiasmo y mucha actividad, pero también gran confusión. Algunos espíritus impetuosos, muy pocos, ya se atrevían a jactarse de que el mundo moderno empezaba a superar a la antigüedad en conocimientos, pero la mayoría de los eruditos, alrededor de 1550 y durante mucho tiempo después, opinaban que estudiar y comprender a los autores antiguos era tan importante como buscar nuevos avances. Incluso a finales del siglo XVII Newton, Leibniz y muchos hombres de menor fama se enorgullecían tanto de su erudición como de su capacidad científica. En modo alguno parecía que un programa de demolición y reconstrucción generalizadas fuese apropiado para el reino de las ideas;

esta clase de política y el gran debate copernicano no empezaron a dominar el panorama hasta comienzos del siglo XVII.

En contraste, si nos adelantamos un siglo hasta los años próximos a 1640, se nos presenta una situación mucho más positiva y los trabajos del siguiente par de generaciones —el período de la revolución científica por excelencia— parecen seguir una sucesión casi lógica. En 1640 los grandes planteamientos metodológicos y programáticos de Bacon, Galileo y Descartes ya habían sido promulgados y se acercaban a su realización. Ya se estaba librando, en más de un frente, una batalla entre el radicalismo intelectual y el conservadurismo, y ya se veían claramente las características definidoras de la «nueva filosofía», como empezaba a llamársela: la puesta en duda de la mera autoridad, la aceptación del copernicanismo y el mecanicismo, la fe en los argumentos empírico-racionales y, especialmente, las matemáticas. En algunas de las principales ciudades europeas se hicieron identificables los centros organizadores del nuevo movimiento científico, que en su mayor parte seguía siendo independiente de las universidades; aunque la penetración en el mundo académico también hacía progresos, era aún más conspicua la fuerza de la actividad de los que, habiendo recibido una formación académica, habían renunciado a los confines de la universidad (Bacon, Descartes y Galileo entran en esta categoría, todos criticaban vigorosamente la filosofía académica). Nuevos libros de texto, compendios, tablas astronómicas, atlas anatómicos dominaban la escena. Por doquier había confianza en los logros del pasado así como la expectativa optimista de nuevas conquistas intelectuales en el futuro que tendrían utilidad para la vida cotidiana. Algunos imaginaban que en el plazo de dos o tres generaciones el empeño humano en comprender las verdades naturales y matemáticas últimas llegaría a buen puerto; bastaba con emprender la tarea con entusiasmo. El siglo de confusión terminó con la muerte de Galileo y el nacimiento de Newton y empezó el siglo de realizaciones. La ciencia quedaría firmemente vinculada a la historia moderna.

La variedad de esfuerzos del siglo XVI hizo que la confusión fuera inevitable. Los «modernistas» que apoyaban respectivamente a Vesalio, Copérnico o Paracelso —por citar una tercera figura que aún no hemos estudiado— casi no tenían nada en común exceptuando la crítica de la ortodoxia. Hubo entonces tensión entre los objetivos

de emular o superar la excelencia de la antigüedad. En 1594 sir Hugh Platte escribió:[1]

> ¿Por qué, pues, deberíamos tener tan mala opinión de nosotros mismos y de nuestros tiempos? Las sendas de los filósofos antiguos, ¿están tan borradas o cubiertas por la vegetación que en nuestros días no queda ningún rastro que permita encontrarlas o seguirlas? ¿O son sus laberintos tan intrincados que ningún hilo de Ariana ayudará a salir a quien haya entrado en ellos?

Estas miradas hacia el pasado, aunque seguirían hasta la disputa entre los antiguos y los modernos (o «Batalla de los Libros») de finales del siglo XVII, ya estaban deparando algo a aquellos que, como Stradamus y Francis Bacon, escribían sobre las jubilosas noticias procedentes de un mundo recién descubierto, o sobre los descubrimientos hechos en tiempos recientes y desconocidos de los antiguos. De manera más limitada cabría contrastar, en la evolución de las matemáticas, las carreras de Federico Commandino (1509-1575) y Rafael Bombelli (1526-1572). Commandino dedicó toda su vida a traducir y editar a los geómetras griegos (sin olvidar la *Pneumatica* de Herón, tan significativa en la física), entre ellos Apolonio, Arquímedes, Aristarco, Pappo y Ptolomeo, e hizo una enorme aportación al avance de las matemáticas en Europa, poniendo al alcance de todo el mundo el más alto nivel del pensamiento matemático alcanzado por los griegos e iniciando la búsqueda de obras de mérito «perdidas», búsqueda que a veces culminaba con su «restauración» por los modernos: Commandino, por ejemplo, completó *Tratado de los cuerpos flotantes*, de Arquímedes, que a la sazón se encontraba en una versión imperfecta. Bombelli —hombre de nivel social muy inferior— era experto en drenaje y trabajaba en la desecación de terrenos pantanosos (el paralelo con Simon Stevin es obvio) y se le recuerda sobre todo como gran algebrista capaz de concebir cantidades tan absolutamente no clásicas como $\pm \sqrt{-10}$, y de operar con ellas. Ciertamente, estudió (en manuscrito) al gran Diofanto, que influyó en él, pero su papel fue el de la última gran figura de la escuela de análisis italiana, la cual introdujo el álgebra en la Europa moderna.

Algo parecido ocurrió en la historia de la mecánica. A través de

1. Sir Hugh Platte, *The Jewell House of Art and Nature*, Londres, 1594, pp. B1-B2.

las ediciones de Commandino, los escritos de Arquímedes en especial tuvieron gran repercusión después de 1540 aproximadamente, tras haber sido casi desconocidos (o al menos poco influyentes, pues fueron traducidos) durante la Edad Media. De pronto florecieron la estática y la hidrostática, muy típicamente problemas relacionados con la determinación del centro de gravedad de los cuerpos: estos estudios atrajeron al joven Galileo, por ejemplo. De repente disminuyó el interés por la tradición aristotélica de la estática, que había dominado durante los siglos anteriores, aunque la práctica de enseñar el principio de los mecanismos por medio de la teoría de las «cinco máquinas simples» —todas reducibles al principio de la palanca— continuó, de nuevo, por ejemplo, en manos de Galileo, que redactó un importante tratado en italiano sobre este tema, que también se remonta a la *Mechanica* de Aristóteles.[2] Por otro lado, no hay duda de que seguían vivos los logros medievales en el estudio de los cuerpos móviles, aunque todavía no se sabe con certeza cuál era su importancia precisa en las postrimerías del siglo XVI. En la época en que Galileo estudiaba en Pisa los nombres de algunos de los grandes filósofos medievales que habían estudiado el problema del movimiento, entre ellos el de «Calculador», aún eran conocidos, y seguían empleándose su lenguaje y sus ideas, pero probablemente sus obras se leían poco (pese a que en parte se habían imprimido). A decir verdad, en los *Principia* Newton utiliza este lenguaje técnico cuando habla de la intensión y la remisión de las cualidades, refiriéndose a su incremento y disminución cuantitativas (del calor, por ejemplo). Curiosamente, la forma sumamente matemática que semejantes comentarios habían adquirido en el siglo XIV quedó ahora completamente abandonada, como si se estuviese preparando su sustitución por una forma matemática totalmente distinta de tratar el movimiento.

Un concepto posclásico que tuvo gran importancia en la mecánica del siglo XVI es el de *impetus*. En su *Física* Aristóteles había categorizado los movimientos sublunares en dos grupos: si ocurrían como

2. I. E. Drabkin y Stillman Drake, *Galileo Galilei on motion and on mechanics*, University of Wisconsin Press, Madison, 1960.

Las «cinco máquinas simples» eran la palanca, las poleas, el torno, el plano inclinado (cuña) y el tornillo: la cuestión en litigio, la obtención de ventaja mecánica. Aristóteles —o quienquiera que fuese el autor de la *Mechanica* (*c.* 300 a.C.)— ya entendía que el aumento de fuerza que se ejerce es equilibrado por la mayor distancia movida en todos los casos. El estudio del plano inclinado resultaría especialmente instructivo para Galileo.

parte del orden de las cosas, eran *naturales*; si eran contrarios a dicho orden (como, por ejemplo, cuando se levanta un peso hacia arriba), eran *violentos*. Aristóteles opinaba que ambas clases de movimiento encontraban resistencia por parte del medio (normalmente, aire o agua) a través del cual tiene que pasar el cuerpo móvil, como, por ejemplo, cuando una hoja cae de un árbol y revolotea hasta el suelo. Por consiguiente, la continuación del movimiento requería una causa o una fuerza que lo produjera; sólo las cosas vivas, dijo Aristóteles, se mueven espontáneamente y por propia voluntad. La tendencia de la naturaleza al orden es la causa de movimiento natural en las cosas terrestres, mientras que el esfuerzo muscular o alguna violencia desacostumbrada en la naturaleza misma (por ejemplo, un vendaval) produce movimiento violento. Todo esto es muy lógico y Aristóteles sigue invariablemente la máxima según la cual no hay efecto sin causa. Por desgracia, la experiencia indica una complicación: con frecuencia *detener* un movimiento violento es tan difícil como provocarlo. Todo el mundo sabía que una embarcación no se para en seco tan pronto como se arrían las velas o se alzan los remos; tampoco la rueda del alfarero se detiene en cuanto él deja de hacerla girar (si se parase, el alfarero no podría trabajar sin ayuda de nadie). Aristóteles no conocía ninguna explicación satisfactoria de por qué continuaba el movimiento después de cesar la causa aplicada, aunque era claramente antinatural y tenía que cesar al cabo de un rato. Lo normal era suponer que Aristóteles enseñaba que el medio (aire en el caso de la rueda del alfarero, la flecha, la bala de cañón, etcétera) transportaba la cosa pesada y por ello fue muy criticado por los filósofos a partir de la época bizantina, es probable que injustamente. En todo caso, había una embarazosa laguna. Siguiendo precedentes anteriores, los filósofos escolásticos decidieron introducir un nombre nuevo para postular una causa nueva: la virtud imprimida o *impetus*. Observaron que algunos cambios son inelásticos: si con un sello se aprieta un poco de arcilla lisa y suave, el dibujo del sello queda grabado al revés en la arcilla. Si se coloca una barra de hierro en la forja, la barra seguirá estando al rojo durante un rato después de retirarla. De modo parecido, arguyeron, cuando alguna causa hace que un cuerpo se mueva, la cualidad movimiento no desaparece del cuerpo tan pronto como la causa deja de actuar. Como dice Leonardo da Vinci, «*impetus* es la impresión de movimiento transmitida al móvil por lo que lo mueve. Cada impresión tiende a la permanencia

o desea la permanencia. Esto lo prueban la impresión que deja el sol en el ojo del espectador y la impresión que hace el badajo al golpear la campana».[3] Así, pues, un proyectil pesado ejerce un efecto destructivo incluso después de recorrer muchos metros desde la máquina que lo lanzó.

La nueva palabra no alteró las categorías aristotélicas del movimiento (Leonardo comenta también: «El movimiento violento, cuanto más se ejerce, más débil se vuelve: el movimiento natural hace lo contrario»).[4] Existía la creencia general de que los movimientos violentos y los naturales de retorno de un proyectil eran rectilíneos y que la caída era perfectamente vertical o casi vertical, como Leonardo la presenta en sus bosquejos. La mayoría de los filósofos (también en esto los sigue Leonardo) —pero no todos— imaginaban que el *impetus*, como el calor al rojo, la pigmentación brillante, la vibración de una campana o la belleza física, era un atributo cualitativo que natural e inevitablemente tendía a cero a no ser que la causa originaria del mismo lo recargase: era una forma de explicar por qué, por ejemplo, una flecha disparada al aire no se aleja indefinidamente de la Tierra, sino que cae de nuevo en ella al cabo de un rato; desde luego, su movimiento también encuentra resistencia por parte del aire. Se deducirá que, como «causa» que no procede de ninguna parte, que es detectable sólo por el único efecto que se le atribuye y que se desvanece, el *impetus* era un concepto insatisfactorio.

No obstante, sí permitía hacer los análisis de los fenómenos del movimiento que Aristóteles no pudo llevar a cabo. Algunos autores (y de su tratamiento quedan rastros en Galileo) recurrían al *impetus* para explicar la pérdida de velocidad de los proyectiles al ascender, y la aceleración de los cuerpos al caer, en términos de una oposición entre la constante atracción hacia abajo que ejerce la gravedad y la fuerza menguante del *impetus*. Mientras prevalecía el *impetus* el proyectil iba hacia arriba, con su exceso sobre la gravedad disminuyendo constantemente; cuando las dos tendencias alcanzaban igual fuerza el proyectil permanecía unos momentos en reposo, suspendido verticalmente, hasta que el aumento de la gravedad sobre el *impetus* lo hacía estrellarse contra la Tierra. Con todo, puede que sea más

3. Institut de France, MS. G 73 r°, citado en Edward MacCurdy, *The notebooks of Leonardo da Vinci*, Cape, Londres, I, 1938, p. 67.
4. *Codice Trivulziano*, 30a, citado en MacCurdy, *op. cit.*, p. 536.

interesante el intento, que duró varias generaciones, de trazar la línea descrita por un proyectil disparado en ángulo con el horizonte. Leonardo, al dibujar balas de mortero que describen una trayectoria elevada, muestra una curva extensa que une la línea recta inicial, «a quemarropa», con una caída vertical igualmente rectilínea. Algunos supusieron que una línea así podía encerrarse en un triángulo y que la proporcionalidad del alcance de tiro podía calcularse partiendo de la proporcionalidad de los triángulos. Muchos —incluyendo a Leonardo— llamaron «mixta» a la parte curvilínea del movimiento. Obviamente, la idea de una mezcla de las categorías aristotélicas de lo natural y lo violento es tan confusa como la idea de mezclar lo celeste con lo terrestre y demostró no tener valor físico ni geométrico, pese a lo cual persistió hasta la época de los *Principia* de Newton.[5] El avance hacia un concepto más claro empezó cuando Niccolò Tartaglia (1506-1557) arguyó en *La nova scientia* (Venecia, 1537), el primer libro dedicado enteramente al estudio de la balística, que la gravedad está en vigor durante toda la trayectoria, desde el momento en que la bala sale de la boca del cañón, por ejemplo, y, por lo tanto, la trayectoria de la bala describe una curva continua hacia abajo partiendo de la línea recta inicial. La mayoría de los artilleros, por supuesto, creían en el ilusorio disparo «a quemarropa». En su libro posterior *Preguntas e inventos diversos* (1546) Tartaglia expresó su convencimiento con mucha más fuerza: no sólo era imposible que un cañón disparase a cincuenta pasos en línea recta, sino que ni siquiera podía hacerlo a un paso en línea recta. Sin embargo, no pudo analizar la curva trazada por el proyectil; nadie más pudo analizarla en el siglo XVI. Los matemáticos repetían como loros que los movimientos sencillos seguían trayectorias rectilíneas y que los movimientos mixtos seguían trayectorias curvas, con lo cual no aclaraban nada, mientras que los artilleros encontraban acertadas filosofías como la siguiente:

> Todo movimiento del mundo termina en reposo.
> Todo cuerpo sencillo es raro y leve
> o denso y grave y de acuerdo con estas diferencias
> es transportado naturalmente
> hacia alguna parte.

5. A. R. Hall, *Ballistics in the seventeenth century*, Cambridge U. P., Cambridge, 1952, pp. 81-83.

Nada funciona de modo natural en aquello
que es totalmente igual o totalmente desigual,
sino en aquello que es contrario a ello
y más débil.[6]

Ahora nos parece obvio que la definición de movimiento de los proyectiles exigiera que antes se definiese la caída libre bajo la gravedad, toda vez que, tal como habían percibido los teóricos del *impetus*, un proyectil es un cuerpo que cae negativamente cuando sube y positivamente cuando desciende. Ahora bien, la naturaleza del movimiento acelerado uniformemente se había estudiado mucho en el

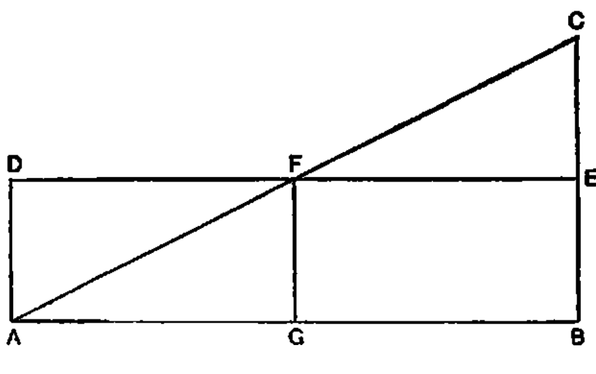


FIGURA 3.1

Demostración de la «regla de Merton» por Oresme

Las ordenadas sobre la base AB representan movimientos instantáneos, todos uniformes si las ordenadas terminan en DE (velocidad constante) si creciendo desde cero hasta el máximo BC terminan en AC (velocidad en aumento uniforme). Los totales de estas ordenadas —el rectángulo ADEB y el triángulo rectángulo ABC— son claramente iguales si E biseca BC y de esta manera G también biseca AB. Esto es, si el movimiento uniforme es igual al movimiento acelerado en su punto medio (en el tiempo, hemos de añadir), las distancias que atraviesan los dos movimientos son iguales. Ahora también es obvio que la superficie del pequeño triángulo rectángulo AFG es la cuarta parte de la del triángulo grande ABC; por lo tanto, en la primera mitad del movimiento acelerado, hasta el punto medio G (en el tiempo) se efectúa una cuarta parte de todo el movimiento, tres cuartas partes en la segunda mitad.

6. Robert Norton, *The Gunner, shewing the whole practise of Artillerie*, Londres, 1628, pp. 3-4.

siglo XIV y se entendía que el cuerpo en movimiento recibía incrementos de velocidad iguales en incrementos de tiempo o de distancia desde el origen también iguales. Leonardo, por ejemplo, aprendió esto del filósofo Alberto de Sajonia (1316-1390), que tal vez fuera el primer filósofo que utilizó la artillería de pólvora, que era relativamente nueva. Seguía de forma inteligente a los comentaristas de la *Física* de Aristóteles en París y Oxford. Si el movimiento acelerado uniformemente se definía mediante cambios iguales de velocidad, entonces, como percibieron ciertos filósofos de mentalidad matemática, en la segunda mitad de un movimiento acelerado se recorrería el triple de distancia que en la primera mitad. De hecho, así se desprende fácilmente de la «Regla de Merton» —llamada así por los historiadores debido a su asociación con los comentaristas aristotélicos del Merton College de Oxford—, según la cual el movimiento de un cuerpo acelerado uniformemente es igual al de un segundo cuerpo que viaja uniformemente, cuando el segundo cuerpo tiene una velocidad constante igual a la del primero en el punto medio de su movimiento (para ser más específicos que los autores medievales, añadiremos que se trata de un punto medio en el tiempo). Oresme, que hizo una demostración geométrica de esta regla, así como de su consecuencia, la proporción 1 : 3 de las distancias, también comprendió que si la división del tiempo en partes iguales se extendía indefinidamente, las distancias sucesivas que recorriera el cuerpo en aceleración serían como la serie continua de números impares: 1, 3, 5, 7, ...[7]

Sin embargo, esta matematización del movimiento acelerado era enteramente abstracta. No tenía nada que ver con la caída de piedras o proyectiles. La primera persona que propuso que cabría suponer que un cuerpo que cayera de modo natural se aceleraría uniformemente, por lo que podría aplicársele el comentario complejo que acabamos de resumir, fue el teólogo español Domingo de Soto (1494/5-1560) en un comentario sobre la *Física* de Aristóteles (1551); Soto era conservador en sus opiniones filosóficas y, al parecer, consideraba que el paso que había dado no era de gran importancia. Nadie más pensaba que lo fuera, aunque el comentario de Soto se reimprimió varias veces y Galileo lo conocía: nadie antes de Duhem se refirió a él como posible precursor de Galileo. El confuso pensamiento del siglo XVI pa-

7. Al no especialista le bastará con Marshall Clagett, *The science of mechanics in the Middle Ages*, University of Wisconsin, 1959, y los artículos apropiados en *DSB*.

rece hallar expresión en el hecho de que antes de Galileo nadie juzgara interesante definir con precisión la forma en que cae un cuerpo pesado, aunque Soto, en un conocido libro, había dado la respuesta en esencia o a partir de eso vio que la definición de la simple trayectoria teórica de un proyectil resultaba fácil una vez trazada la distancia de caída. (La otra idea requerida es, por supuesto, la del análisis vectorial del movimiento.) No obstante, muchos autores se interesaron por el movimiento de los proyectiles y bastantes, aparte de Galileo, por el movimiento de caída (G. B. Benedetti y Simon Stevin, por ejemplo): se dice que las famosas pruebas que realizó Galileo en la torre inclinada de Pisa, para ver si cuerpos de distintos tamaños caen a la misma velocidad en el aire, despertaron enorme interés. Sin embargo, no encontramos ningún indicio de que en aquel tiempo Galileo estuviere familiarizado con la definición de la caída libre que hiciera Domingo de Soto.

Todos los elementos de lo que la siguiente generación consideraría un éxito importante, un punto decisivo en la innovación, ya se hallaban presentes, pero nadie acertó a dar con la manera de juntarlos. En parte se debía a un exceso de realismo: a los autores que se ocupaban de esta clase de problemas les obsesionaba (siguiendo la tradición de Aristóteles) la influencia del aire en el movimiento —que es en verdad muy grande, como por fin han descubierto incluso los fabricantes de automóviles. Al estudiar este complejo factor, se les escapó una verdad sencilla, demasiado sencilla. En segundo lugar (y también siguiendo a Aristóteles), les preocupaban demasiado las características concretas del cuerpo pesado —asimismo, les parecía obvio que su *cualidad* debía afectar su modo de comportarse en movimiento. Y, en tercer lugar, estaban más atentos a encontrar una explicación causal del movimiento que a describir cómo se producía: esto se encuentra, por ejemplo, en las primeras notas de Galileo sobre este tema (las llamadas *Juvenilia*) escritas a finales del decenio de 1580 o alrededor de 1590, en la época de las pruebas en la torre de Pisa.[8] Aunque estos pensamientos relativos al movimiento, los

8. Véanse Drabkin y Drake (en nota 2, arriba). De acuerdo con la fecha aceptada, Galileo tenía de hecho veintiséis años de edad cuando redactó *Sobre el movimiento.* Las pruebas realizadas en la torre inclinada, desacreditadas durante mucho tiempo, han sido revalidadas recientemente por Stillman Drake: no hay testimonio de ellas fuera de la biografía que Viviani escribió de su maestro. Ciertamente, en aquella época Galileo ya creía —como Benedetti antes que él— que dos cuerpos del mismo material y de

primeros que se conocen, contienen números arbitrarios (también los hay en Aristóteles), son preponderantemente cualitativos y no cuantitativos en su forma. En su obra madura, después de más de veinte años de investigación y perplejidad, Galileo abandonaría del todo el enfoque historicista y recurriría a otro completamente nuevo para estudiar los problemas del movimiento, enterrando virtualmente los estudios medievales y renacentistas como si nunca hubieran existido.

Sin embargo, en el campo de la mecánica, donde Galileo inauguraría un sistema de pensamiento nuevo y diferente, había una continuidad evidente: su definición del movimiento acelerado de forma natural es la misma que la de Soto, y las dos primeras proposiciones de su tratamiento geométrico de la misma están estrechamente relacionados con la versión de Oresme de la «regla de Merton» (pp. 123-124). La situación es otra si de la teoría del movimiento, disciplina académica acreditada, pasamos a un campo más o menos integrado de conocimientos y especulaciones que se extienden desde las ideas de la materia hasta la medicina pasando por la «química». Hasta años recientes no se ha empezado a hablar de una «ciencia de los materiales». Es curioso que, con el tiempo que llevan los hombres rodeados de una inmensa variedad de materiales imprescindibles para la vida cotidiana —metales, minerales, tierras, madera, etcétera—, el estudio sistemático de las propiedades de los mismos sea una cosa reciente: cuando a finales del siglo XVIII la química, tras aparecer como ciencia organizada y discreta, se ocupó de la composición y la estructura interna de las sustancias, mostró escaso interés por sus propiedades brutas (tales como la resistencia), que se abandonaron a la atención de ingenieros y fabricantes. Antes de que apareciera la química no había ningún conjunto coherente de conocimientos relativos a los materiales y a la sustancia, lo cual también se debía a que la filosofía aristotélica consideraba que la materia era un «elemento» informe, sin carácter, y atribuía toda diferenciación y todas las propiedades a las cualidades estampadas en ella.

Al buscar las fuentes de la química científica del siglo XVIII, de la metalurgia del siglo XIX y de la «ciencia de los materiales» del siglo XX, el historiador sólo puede remontarse hasta diversas habili-

tamaños distintos caerían a velocidades muy parecidas, pero no se interesó por definir el cambio de velocidad durante la caída.

dades artesanales (en la refinación de metales, la cerámica y otras aplicaciones del fuego) que empezaron en la prehistoria y a escritos alquímicos y iatroquímicos que comenzaron a constituir una literatura reconocible en Europa durante la segunda mitad del siglo XV. Los textos académicos, filosóficos, no sirven de nada en este contexto; los textos tecnológicos, cuando aparecen en el siglo XVI, nos ayudan a comprender los métodos, pero no iluminan el reino de los pensamientos. Tienen verdadera importancia propia y los mejores de ellos —como la *Pirotechnia* (1540), de Vanoccio Biringuccio, y la *De re metallica* (1556), de Agricola— alcanzaron un éxito merecido en forma de reimpresiones y traducciones, pero sus autores no se convirtieron en líderes de escuelas o movimientos y ni siquiera parece que dieran peso a los filósofos empíricos como Francis Bacon. Y esto es de lamentar en la medida en que eran los autores serios como estos, y no la tribu de los alquimistas, quienes representaban la verdadera suma de seis mil años de evolución de las artes pirotécnicas.[9] Es evidente que sus habilidades no cautivaron la imaginación: tal vez para que la investigación de las propiedades de los materiales «químicos» pudiera tener mucho éxito debía estar relacionada con pretensiones extravagantes sobre la prolongación de la vida y la fabricación de oro. Al menos parece que fue así tanto en China como en Occidente, a no ser que estas dos tradiciones en apariencia distintas estén en realidad íntimamente relacionadas.

Los alquimistas tradicionales de la Edad Media y el Renacimiento (si se les puede llamar así) guardaban silencio en torno a sus éxitos, siguiendo los consejos de la prudencia. No buscaban enemigos ni discípulos. El hombre que inauguraría en Europa un nuevo culto al arte pirotécnico, Theophrastus Bombastus von Hohenheim, que se hacía llamar Paracelso (1493/94-1541), era una figura provocativa, extravagante e inflamadora (en sentido literal: una vez, en Basilea, quemó en público las obras impresas de Avicena). Desdeñaba a la autoridad, defendía vigorosamente sus propios méritos y era un alborotador de lo más enérgico en sus palabras y escritos (la mayoría en alemán suizo, pues despreciaba el latín). Probablemente había estudiado en universidades italianas, era un agudo observador de las

9. Sobre este tema, véanse los libros de Cyril Stanley Smith empezando por su edición de la *Pirotechnia* de Biringuccio (trad. de Martha T. Gnudi), 1942, reimpresa por Basic Books, Nueva York, 1959.

enfermedades y se apuntó algunos éxitos profesionales notables, sobre todo en el tratamiento de heridas y de llagas crónicas. Pero fue el legado de sus escritos, muchos de los cuales no se conocieron hasta después de su muerte, lo que convirtió a este extraño hombre en uno de los pensadores más influyentes de la Europa renacentista.

Paracelso no era en modo alguno un autor lúcido ni un autor cuyo mensaje se entendiera con facilidad. Tampoco hay en su mensaje elementos perceptiblemente «modernos»; como los que se encuentran en Copérnico y en Vesalio: no existe ninguna línea recta entre Paracelso y la ciencia moderna y, a pesar de sus habilidades «químicas», no era (como dice Walter Pagel) «ni científico ni químico en el sentido moderno».[10] Tal vez lo más obvio que puede decirse de él sea que rechazaba por completo la clásica teoría humoral de la enfermedad, que equivale a creer que los síntomas de la enfermedad —la dificultad de respirar o retener los alimentos, dolor, hinchazones, fiebre, etcétera— los producían uno o más defectos de la constitución interna del paciente, defectos cuya causa última podía ser la herencia, una vida poco sana, los resfriados, los esfuerzos excesivos, los excesos en el comer, etcétera. Según la patología humoral, las enfermedades no tenían causas sencillas, identificables, y, ciertamente, ningún agente causal en correspondencia de uno a otro con un complejo de síntomas. Paracelso, por el contrario, creía que existían causas específicas de enfermedad. Había comprobado que el bocio tenía cierta relación con el agua bebida por quienes lo padecían. Otras sustancias ingeridas, especialmente minerales —Paracelso era oriundo de las regiones mineras del sur de Alemania—, podían ser agentes de enfermedades: también podían serlo venenos que había en la atmósfera y que procedían de las estrellas, especialmente en el caso de trastornos de comportamiento o de la psique. Si un hombre tiene tendencia a la avaricia, dice Paracelso, es porque ha elegido a Saturno por esposa, pues cada estrella es una mujer; y si un hombre padece melancolía, es inútil tratar de purgarle la bilis negra: más bien hay que liberarle de las influencias astrales.[11] A veces Paracelso habla de las «semillas» de las enfermedades del hombre, creado por Dios al principio. En sentido muy general, cabría decir que los microbios

10. Walter Pagel, *Paracelsus: an introduction to philosophical medicine in the era of the Renaissance*, Karger, Basilea y Nueva York, 1958, p. 344.
11. *Ibid.*, pp. 150, 138.

patógenos de Paracelso son venenos o influencias astrológicas; ninguna de las dos cosas es «moderna» y la última concuerda (al peculiar modo de Paracelso) con una antigua creencia sobre la mala salud. Pero tal vez aún más importantes que las innovaciones patológicas y las declaraciones generales sobre la relación entre el hombre (el microcosmos) y el universo fuera la nueva terapia de Paracelso, la producción de armas nuevas y a menudo espectaculares para combatir la enfermedad. La farmacia tradicional que se remonta a Dioscórides era herbal; de hecho, durante la Edad Media ninguna línea clara separaba la botánica de la farmacia, puesto que no existía el interés, más bien filosófico, que Aristóteles y Teofrasto habían mostrado por las plantas. Normalmente, en la polifarmacia se combinaban ingredientes sacados de numerosas plantas y se creía necesario un largo proceso de hervir y calentar para extraer sus virtudes. También se utilizaban sustancias animales, especialmente las víboras que entraban (junto con muchas más cosas) en la triaca de Venecia (*Theriacum*), mientras que los minerales se utilizaban principalmente para las aplicaciones externas. Este arsenal, en su mayor parte suave por no decir ineficaz, se había visto enriquecido, hacia el final de la Edad Media, primero por el descubrimiento de la manera de destilar alcohol, al que se consideraba un gran reconstituyente por sí mismo y un estupendo solvente para sustancias activas («la tintura de yodo» quizás existe todavía). Por otra parte, en tiempos de Paracelso ya se empleaba mercurio para el tratamiento de la sífilis. (A la sazón se consideraba, probablemente con acierto, que la sífilis era una enfermedad nueva y que su curación requería un medicamento nuevo. Algunos lo encontraron en la madera del guayacán procedente del Nuevo Mundo, lugar de donde procedía también, al creer de muchos, la nueva enfermedad. El mercurio, con sus efectos espectaculares en el paciente, resultaba más eficaz, en parte debido a la tendencia normal a que desapareciesen los primeros síntomas penosos.) Típicamente, Paracelso desaprobaba la administración de dosis masivas de mercurio con sus consecuencias tóxicas: creía en las útiles propiedades medicinales de los metales (incluyendo el arsénico y el antimonio además del mercurio), pero decía que las dosis tenían que ser pequeñas y que la acción violenta del remedio debía mitigarse cambiando de forma química. Los metales y los minerales son venenos, dice Paracelso, pero, de acuerdo con el principio homeopático de que lo igual cura a lo igual, también curan si se usan apropiadamente: «Un agu-

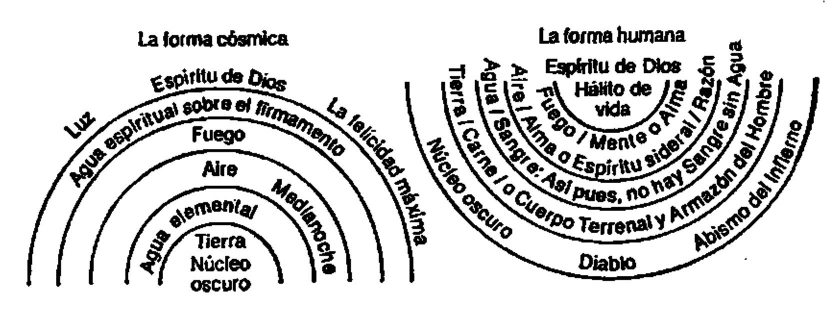


FIGURA 3.2

Una forma de la analogía microcosmos-macrocosmos ideada por Paracelso

De Pagel, *Paracelsus*, 1958, p. 119.

jero que pudre la piel y corroe el cuerpo, ¿qué otra cosa es sino un mineral? El colcótar —el *caput mortuum* del vitriolo— remedia el agujero. ¿Por qué? Porque el colcótar es la sal que hace el agujero». En la filosofía de Paracelso esto es la consecuencia lógica de la analogía entre el microcosmos (interno) y el macrocosmos (externo): el colcótar patógeno u otra sustancia interna del cuerpo debe ser vencido introduciendo desde fuera la misma sustancia curativa. Para ello puede que se requiera tratamiento químico, como en el caso del arsénico (que también es un veneno, como sabe Paracelso), que debe «matarse» antes de utilizarlo como fármaco: por ejemplo, el arsénico blanco puede calentarse con salitre «hasta que forma un sedimento parecido a la manteca en el fondo del crisol». Al verterlo, adquiere un matiz dorado y puede disolverse en alcohol o mezclarse con tártaro. Es bueno para combatir las llagas sifilíticas y de otras clases.[12]

Sin necesidad de más detalles y ejemplos, estamos seguros de que la idiosincrática terapia de Paracelso tuvo dos consecuencias históricas de gran importancia. En primer lugar, los paracelsistas del Renacimiento llegaron a formar una escuela de medicina y farmacia que rivalizaba con la galénica: una escuela revolucionaria, ya que durante mucho tiempo los galenistas ocuparon todos los puestos académicos y oficiales e hicieron cuanto pudieron para que se declarase

12. *Ibid.*, pp. 147, 145.

ilegal la práctica de los paracelsistas: a lo largo del tiempo la disputa mostró pautas similares en distintos países. De una manera especial se libró en medicina una batalla entre los antiguos y los modernos que fue tan general y ruidosa como la que libraron copernicanos y aristotélicos: pero el final consistió en una solución intermedia en vez de en un cambio ideológico fundamental como ocurrió en la astronomía. Muchos remedios paracelsianos acabaron engrosando la farmacopea oficial, mientras que algunos polifármacos tradicionales, como la triaca, fueron expulsados o racionalizados hasta reducirlos a la inanidad. En 1613 la Farmacopea de Augsburg autorizaba la utilización de remedios químicos cuando estaban «preparados y prescritos de acuerdo con las instrucciones de médicos de gran experiencia que saben combinar la racionalidad con el experimento». Pero los fármacos se han extraído siempre de las plantas y gran parte de los fundamentos filosóficos de Paracelso se esfumó. En cambio, la idea de la «química» (pirotecnia) como criada de la medicina prosperó. Los estudiantes de la reactividad química tenían ahora un objetivo definido para sus operaciones empíricas (aparte del engaño alquímico): podían albergar la esperanza de descubrir remedios nuevos, eficaces, agradables al paladar e inofensivos. En su búsqueda contaban con la ayuda de ciertos principios —débiles y engañosos, es verdad— que les servían de guía, tales como la creencia de que en toda sustancia hay un principio «arcano» que debe *extraerse*: no mezcléis cosas negligentemente, había dicho Paracelso, sino que deberéis extraer el *arcanum* puro. De esta manera la «química» se convirtió en una ciencia práctica muy importante; de hecho, la ambición terapéutica de los paracelsistas fue lo que inició la separación entre la «química» y la alquimia, separación que fue muy gradual.

Cabría argüir que, desde el punto de vista histórico, este grupo, los seguidores de Paracelso, fue más importante que el propio maestro, de quien se ha dicho que «ayunaba por la mañana, se emborrachaba por la noche y presentaba las ideas siguiendo exactamente el orden en que se le ocurrían»,[13] aunque sólo fuera porque los discípulos desarrollaron gradualmente un sistema coherente, menos extravagante. Los escritos de Paracelso fueron recopilados por Johannes Huser, un médico de Baden, y publicados en Basilea entre 1588 y 1590. Pero en Alemania ya eran algo conocidos gracias a los esfuer-

13. F. Hoefer, *Histoire de la chimie*, París, 1866^2, II, p 5.

zos de Leonhart Thurneisser (1531-1595/6), curandero y alquimista impostor, Alexander von Suchten, Gerard Dorn y otras figuras de menor importancia. Aunque el centro de devoción a Paracelso (y a la alquimia) seguiría estando en Alemania, algunos de sus primeros exponentes más influyentes eran franceses, especialmente Quercetanus (Joseph du Chesne, 1544?-1609) y Teodoro Turquet de Mayerne (1573-1655), que en 1606 hallaría refugio en Inglaterra, pues en París los defensores de la medicina tradicional resultaron ser chillones y poderosos. Du Chesne era un químico competente que utilizaba un lenguaje inteligible; a él se ha atribuido la introducción en la medicina de los calomelanos (protocloruro de mercurio, poderoso purgante, la «píldora azul»). De Mayerne tuvo mucho que ver con la modernización de la medicina inglesa (sobre todo a través de la London Pharmacopoeia, 1618) y la introducción de la química en Inglaterra (fue el fundador, mucho más adelante, de la Company of Distillers of London). Y después de ellos llegaron los primeros autores de libros de texto de «química»: Oswald Croll, Jean Beguin y Andreas Libavius.

De estos textos nació la teoría *spagirica* o de los principios químicos de Paracelso, la sal, el azufre y el mercurio, los *tria prima* en oposición a los cuatro elementos de los filósofos: de hecho, la diferencia de los *nombres* no es importante, puesto que la sal siguió siendo el principio de la tierra; el azufre, el del fuego, y el mercurio, el de la fluidez, mientras que los químicos, como aristotélicos, continuaron hablando también de «aires». Tampoco era el «aire» la única clase (o «estado» de la materia, hablando anacrónicamente) reconocida por los «químicos», aunque no reunía las condiciones necesarias para ser considerado como principio: los metales —a los que se suponía compuestos de azufre y mercurio—, los ácidos y, a su debido tiempo, los álcalis, eran considerados como importantes tipos de sustancia: desde el primer momento, al parecer, este reconocimiento de tipos de sustancias activas fue tan significativo como el reconocimiento de principios (siempre inasequibles). Parece que los antiguos nunca prestaron especial atención al hecho de que algunos materiales son a todas luces más vigorosamente activos que otros (por ejemplo, el vino y el opio en relación con el cuerpo animal),[14] no sabían nada de

14. El nombre *laudanum* se lo dio Quercetanus al extracto (tintura) alcohólico del opio.

ácidos y de álcalis fuertes —pues no elaboraban jabón de lejía— y prácticamente ignoraban que los minerales activos, en su mayor parte compuestos metálicos, se encontraban en la naturaleza. Al igual que el jabón, la pólvora y el alcohol destilado eran desconocidos en el mundo clásico; lo poco que se sabía de los cambios extraños, hermosos y a veces espectaculares producidos por la combinación (y quizás el calentamiento) de dos o tres sustancias distintas estaba limitado a la tecnología —la fabricación de vidrio, por ejemplo— y era muy ajeno a la experiencia filosófica. Si Paracelso tuvo algún precursor, éste sería Juan de Rupescissa, franciscano del siglo XIV. La más prometedora de las innovaciones intelectuales de Paracelso, por lo tanto, fue su idea de la actividad —nosotros diríamos reactividad— de la materia.

Según parece, Paracelso no pretendía ser alquimista en el sentido corriente de la palabra: decía que la alquimia que enseñaba y ejercía era la preparación de «remedios secretos», con los cuales uno cura enfermedades que se consideran irremediables, y creía que ésta era la actividad a la que se dedicaban los alquimistas antiguos. Naturalmente, también creía en la posibilidad de transmutar metales, como demostraba la transformación del hierro en cobre (los objetos de hierro sumergidos en agua rica en vitriolo disuelto quedaban recubiertos de cobre: este es el origen de los «cacharros de herrengrundita» de Bohemia) o el hecho de que el cobre amarillease por efecto de la calamina (la fabricación de latón aleando cinc con cobre). Pero la busca de plata u oro artificiales no le parecía un objetivo apropiado para alguien que pretendía curar a los enfermos, pese a que debía de estar tan familiarizado con hornos, carbones, alambiques y la destilación como el alquimista tradicional. Como la palabra *química* (chimie, chemie, etcétera) para referirse a un arte práctico relacionado con la preparación de sustancias útiles, en especial medicamentos, no fue de uso general hasta la segunda mitad del siglo XVII, hubo un largo período durante el cual la palabra *alquimia* tuvo un significado ambiguo, pues abarcaba mucho más que la busca de oro artificial y de la piedra filosofal. Al igual que Paracelso, Andreas Libavius (muerto en 1616), que no tenía nada de paracelsista totalmente convencido, definió la alquimia como el arte de extraer magisterios perfectos y esencias puras de cuerpos compuestos, un arte útil en la medicina, la metalurgia y en la vida cotidiana. El título de una de sus obras, traducido, reza: *El ejercicio de la alquimia, esto es, el método*

de la preparación artificial de los principales medicamentos químicos explicado en dos tratados: de los cuales el primero fue escrito por un autor anónimo partiendo de su propia experiencia relativa a la destilación de aguas y aceites, de sales y esencias; el segundo trata de la piedra filosofal, en el cual el método de prepararla se enseña sin metáfora ni parábola..., Francfort a.M., 1603. A Libavius se le suele presentar como «el autor del primer libro de texto de química» (su *Alchymia*, 1606), aunque en todos sus escritos se combinan la «química» tal como la entendemos nosotros —una ciencia racional, experimental— y la alquimia en el sentido actual de la palabra; de hecho, era muy crédulo.[15] Que Paracelso seguía vivo en su sepultura era uno más de sus cuentos. Pocos autores de «química» hasta Robert Boyle (1627-1691) inclusive consideraban que la transmutación de metales fuese *en principio* imposible, aunque mentes más sabias tendían a mostrarse escépticas ante los numerosos cuentos circunstanciales sobre la producción de oro alquímico que se oían por aquel entonces; a decir verdad, no había aún ninguna razón teórica ni teoría de la materia que prohibiese tal transmutación; sólo el sentido común y la experiencia estaban en contra de ella.

Así, pues, una consecuencia de las enseñanzas de Paracelso fue unir firmemente la «química médica» (iatroquímica) y la alquimia, como simples variantes gemelas de un mismo arte; algunos de los sucesores de Paracelso incluso opinaban que éste era sencillamente alguien que se había desviado de la tradición más antigua y más segura de los alquimistas, que se remontaba a Geber entre los árabes, a María la Judía y al mismísimo Hermes Trimegisto. (Las autoridades en la materia discrepan en torno al grado de habilidad práctica que mostró Paracelso en sus escritos: Pagel le considera muy experimentado, pero Partington opina que sus conocimientos los había sacado de los libros.) A partir de los comienzos del siglo XVII empezó a destacarse una línea más estrictamente farmacéutica, distinguida por autores como Jean Beguin (*Tyrocinium chymicum*, 1610) y a su vez de ésta, como raíz principal (pero en modo alguno única), nació la química filosófica, esto es, el estudio objetivo de la reactividad y el cambio químico. No obstante, a principios del siglo XVII la transformación de la «química» en una teoría de la materia aún estaba muy

15. J. R. Partington, *History of chemistry*, II, Macmillan, Londres, 1961, pp. 248, 250.

lejos y su aliada natural era una filosofía esotérica más que una filosofía mecanicista. Del mismo modo que la realidad de las maravillas mecánicas, sobre todo de los autómatas, hacía plausibles los cuentos sobre pájaros artificiales o máquinas de movimiento perpetuo, también los fenómenos genuinos y extraordinarios del cambio químico daban color a maravillas aún más grandes que la transmutación. Persistente y notable es la historia del fénix químico; tal como la cuenta Paracelso:[16]

> Cualquier hombre puede hacer que el huevo madure bajo su propio brazo y procrear el polluelo tan bien como la gallina. Y aquí hay que hacer mención de algo más. Si el pájaro vivo fuera quemado y reducido a polvo y cenizas en una *curcurbit* (vasija) cerrada herméticamente con el tercer grado del fuego, y luego, todavía cerrada, se pudriera con el grado más alto de putrefacción en un *venter equinus* (vientre de caballo = calor de sangre), entonces esa flema puede hacerse madurar de nuevo y así, renovada y restaurada, puede convertirse en un pájaro vivo, siempre y cuando la flema se encierre una vez más en su tarro o receptáculo. Esto es resucitar a los muertos mediante la regeneración y la clarificación, lo cual es en verdad un milagro grande y profundo de la naturaleza... Este es el más grande y el más elevado milagro de Dios, que Dios ha revelado al hombre mortal...

Este cuento se parece a otro posterior del que dio noticia Quercetanus y que se refiere al crecimiento de plantas partiendo de cenizas en vasijas cerradas herméticamente bajo un calor suave, conseguido por un polaco cuyo nombre se ignora; otros afirmaban que las sales obtenidas de las cenizas de las plantas revelaban en sus cristales la forma de las plantas de donde procedían las cenizas.[17] Tal vez el origen de todas estas historias esté en el hecho de que las plantas brotan de forma natural y libre de la tierra quemada; ciertamente, pueden considerarse como símbolos de los procesos misteriosos de la muerte y la regeneración. (Pero eso deja sin resolver el problema de la mente incapaz de distinguir entre símbolo y hecho, mito y realidad.)

Y en verdad que la magia impregna los escritos de Paracelso y sus seguidores; y no es meramente una magia de alto nivel, esotérica

16. A. E. Waite, *Hermetical and alchemical writings of Paracelsus*, Londres, 1894, I, p. 121.
17. Partington, *loc. cit.* (en nota 15), p. 169.

y metafísica como la que se relaciona con el neoplatonismo, sino una magia vigorosa, eficaz. A partir de mediados del siglo XVII, debido a la influencia conjunta de Descartes y Boyle, la acción benéfica de los medicamentos químicos se interpretó en términos mecanicistas, aunque bastante fantásticos a su manera. Pero en el período paracelsista se les consideraba poseedores de una acción esencialmente mágica, y los seguidores de Paracelso no limitaban semejante virtud a las sustancias minerales y sus derivados. Estaban muy dispuestos a atribuir grandes méritos al material mágico de tipo más antiguo, como, por ejemplo, al hueso de una calavera, con tal de que estuviese químicamente preparado. Del mismo modo, Paracelso insiste en el vínculo estricto entre *forma* y *utilización* denominado la «doctrina de los signos» (que no es distinta de la fe *a priori* de los anatomistas al deducir la función de la morfología), de buenos antecedentes medievales:[18]

> Ved la raíz *satyrion*, ¿acaso no está formada como las partes pudendas del varón? Por consiguiente, la magia la descubrió y reveló que puede restaurar la virilidad y la pasión de un hombre. Y luego tenemos el cardo: ¿acaso sus hojas no pinchan como agujas? Gracias a este signo, el arte de la magia descubrió que no hay mejor hierba contra la picazón interna... Y la *syderica* lleva la imagen y la forma de una serpiente en cada una de sus hojas y así, según la magia, brinda protección contra cualquier clase de envenenamiento.

Inevitablemente, también las estrellas surten un efecto mágico sobre los hombres: «Un hombre sano debe someterse al cielo y cada día debe esperar lo que el cielo le envíe». Ciertamente, en Paracelso no se da el caso de que la química brinde una nueva entrada en el estudio racional de la naturaleza (esto es, un estudio que suponga una relación regular entre causa y efecto), ni que los remedios químicos ofrezcan una forma segura de escapar de ese mundo peligroso donde la enfermedad es el efecto del dardo de los elfos, del hechizo mágico o de la malevolencia astral; al contrario, Paracelso sencillamente utiliza el mundo nuevo de procesos y fenómenos químicos para ensanchar el reino de la magia. Como dice Lynn Thorndike,[19]

18. Paracelso, en J. Jacobi, ed., *Selected writings*, Routledge, Londres, 1951, pp. 196-197.
19. L. Thorndike, *History of magic and experimental science*, V, Columbia University Press, Nueva York, 1941, p. 628.

para Paracelso no existe la ley natural y, por consiguiente, no existe la ciencia natural. Incluso la fuerza de las estrellas puede ser desviada, frustrada o moderada por la intromisión de un demonio. Hasta la enfermedad más grave puede rendirse ante un oportuno encantamiento o rito mágico. En todas partes hay misterio, animismo, fuerzas invisibles.

Walter Pagel, el principal estudioso moderno de Paracelso, está de acuerdo en que éste rechaza el pensamiento racional, que en verdad es «inspirado por una profunda desconfianza en el poder del razonamiento humano», y cree que las grandes verdades de la naturaleza más bien se aprenden «en sueños y trances fortalecidos por una voluntad y una imaginación fuertes». Esto ocurre porque lo que mejor percibe la naturaleza no es el cerebro, que la examina como algo externo, sino el «cuerpo astral» de un hombre, que forma (como microcosmos) directamente parte de la naturaleza y, por ende, percibe estas verdades directamente, intuitivamente: es de suponer que un escritor tan imaginativo como D. H. Lawrence se hubiera mostrado de acuerdo. Porque el conocimiento en el verdadero sentido paracelsiano no es una «historia» sobre «cosas» inventada en el cerebro —esa fue la equivocación de Aristóteles—, sino que, al contrario (como escribe Paracelso), está dentro de cosas, aparentemente como esencia y virtud de las mismas. Y quien tenga este conocimiento de todas las cosas (los poderes de las estrellas además de las virtudes médicas de las plantas) es el Mago: «si un hombre no va a otra escuela que la que está hecha de ladrillos y argamasa y no busca otro maestro que el que enseña desde detrás de la estufa, a nada llegará excepto superficialmente». Pero los magos del pasado nunca enseñaron ni buscaron el «saber libresco del hombre mortal» y nosotros deberíamos seguir su ejemplo. Paracelso se parece a los místicos religiosos y a muchos alquimistas, al considerar que la verdad que surge de la ilustración es trascendental, inasequible mediante los procesos literarios de estudio normales.[20]

De esto no debería inferirse que Paracelso no desarrollara ninguna filosofía natural propia, ni que, por proclamarse no enseñado, se abstuviera de tratar de enseñar a los demás. Al contrario, Paracelso fue el autor de una filosofía natural «alternativa», presentando una

20. W. Pagel, *op. cit.* (en nota 10), pp. 50-51, 63.

visión mágica del mundo que no sólo es distinta de la de Aristóteles, Galeno y los filósofos cristianos de la Edad Media, sino del neoplatonismo redivivo que también contribuyó con fuerza al hermeticismo del Renacimiento. El paralelismo de microcosmos y macrocosmos aparece en ambos, pero el neoplatonismo no sabía nada de los tres principios químicos, ni de la importancia médica de las influencias celestes en las que insiste Paracelso en su doctrina de las correspondencias. También del tiempo parece tener Paracelso un concepto propio, muy relativista. Además, Pagel ha señalado que la importancia que da Paracelso a lo orgánico —que no es característica del neoplatonismo— y a la individualidad específica de cada ser orgánico se contradice con la teoría del microcosmos-macrocosmos, cuya lógica conduce más bien a la idea de una difusión o compartimiento de la vida universalmente. Según Paracelso, cada ser contiene un Vulcano o Archeus que es quien lo fabrica partiendo de la materia primordial; las plantas son los productos vivos de la Tierra, formados por el «Vulcano de la Tierra», mientras que en los animales y el hombre el Archeus es el principal habitante del estómago, donde preside las funciones de la digestión y la nutrición. (Es, pues, afín a la Facultad Nutritiva de Galeno.) Lo «dirige toda hacia su naturaleza esencial», función ésta imitada por el médico (especie de Archeus humano) en la preparación de medicinas. La sede de la vida, no obstante, está en el corazón —aquí, por una vez, Paracelso coincidió con Aristóteles. Finalmente, además de este cuerpo carnal el hombre posee un «cuerpo astral» —cuyo significado es quizá lo que otros han llamado el espíritu o alma del hombre—, por medio del cual el hombre tiene una comunicación directa con el mundo exterior y puede predecir los acontecimientos que se producen en él. Funciona, por ejemplo, en los sueños, los cuales «indican ciertos trabajos de la naturaleza que están en marcha en aquel momento. Por ejemplo, un sueño en el que salgan agua o peces señala la maduración de minerales, sales, metales, arena, etcétera, todos los cuales son productos de este elemento».[21]

Si este intento de describir brevemente el complejo pensamiento de un pensador confuso parece apenas inteligible, ello se debe a que al autor le resulta imposible conceder significado a muchas de las declaraciones (traducidas) de Paracelso, o percibir la fuerza de su

21. *Ibid.*, pp. 72-81, 104-106, 121.

inspiración. ¿Cuál es la virtud de todos los extraños términos que inventó para su discurso: el Oportet, el Archeus, el Iliaster, Truphat y Leffas? (El único nombre de esta clase que ha sobrevivido es *gas*, inventado por Van Helmont.) ¿Por qué trazó un lazo tan fuerte entre la innovación y la credulidad absurda, el escepticismo y la superstición? Sin embargo, en el nivel histórico más sencillo, ejerció, a través de sus seguidores, una influencia inmensa en la farmacología y, por ende, en la marcha de la ciencia que más adelante se denominaría química. Su influencia y vestigios de su lenguaje aparecen de manera más sutil en toda clase de lugares, como, por ejemplo, en los escritos de Bacon. Si bien Bacon acusó a Paracelso de convertir «el hombre en una Pantomima» y lo tachó de criador fanático de fantasmas, también opinaba que había estimulado la experimentación.[22] Evidentemente, el pensamiento anticonvencional y la reacción contra la autoridad, por no citar el recurso a la «naturaleza» y al empirismo, podían asumir muchas formas y conducir en muchas direcciones. El pensamiento racional, científico era para Aristóteles sólo una réplica entre varias, de las cuales las dos que se relacionan especialmente con los nombres de Hermes Trimegisto y los demás *prisci theologi*, esto es, el neoplatonismo y el paracelsismo, estaban impregnadas de conceptos mágicos, no sólo la idea del universo mágico, sino la idea de la magia como control de la naturaleza.

Huelga decir que trazar semejantes distinciones es en cierta medida anacrónico: las líneas entre «ciencia» y «magia» aún no estaban trazadas con mayor firmeza que las líneas entre la astrología y la astronomía. La «magia natural» con el empleo de los extraordinarios fenómenos del magnetismo, la óptica, la neumática, etcétera (como los consideraban las personas sencillas), nunca fue magia en el verdadero sentido que el filósofo da a la palabra. Muchos filósofos y matemáticos, así como los seguidores de Paracelso, eran también «magos», entre ellos (como ya hemos indicado) Girolamo Cardano, hombre de poderoso intelecto e inquietudes universales, pero sumamente inestable; en modo alguno, ejemplo de individuo progresista, juicioso, que edifica el futuro, Cardano tiene un lugar inmortal en la historia de las matemáticas modernas y fue muy leído e influyente en el siglo XVI. Su *De subtilitate* (Nuremberg, 1550) fue objeto de seis ediciones

22. Paolo Rossi, *Francis Bacon. From magic to science* [1957], Routledge, Londres, 1968, pp. 31-57.

durante sus diez primeros años. Se trata de una enciclopedia de la filosofía natural que abarca las ciencias naturales y mentales y cuyo capítulo diecinueve está dedicado a los demonios, de cuya existencia no duda Cardano, como no dudaban tampoco Henry More (1614-1687), el platónico de Cambridge, el «escéptico» Joseph Glanvill y, por supuesto, muchos más. A decir verdad, muchos de los hombres más cultos de esta época eran enemigos infatigables del crimen de la brujería: por ejemplo, en las colonias de América, Cotton Mather (1668-1728); de hecho, cuanto más culto era un hombre, más historias podía contar sobre las actividades de los demonios, como hace Cardano basándose en Felipe Melanchton y Erasmo, así como en las fuentes clásicas. Cardano también era muy crédulo en lo referente a la astrología y todas las demás formas de adivinar el futuro. Pero hasta sus contemporáneos le consideraban extravagante.

Una figura un tanto parecida, a la que se ha dado mucha importancia, y que en el mundo de habla inglesa es sin duda más conocida que Cardano, es el enigmático John Dee (1527-1608). En la corte de Isabel I, Dee fue protegido como mago y astrólogo; su fama en las artes supuestamente «negras» provocaría el saqueo de su casa de Mortlake, en las afueras de Londres, por parte de una chusma enfurecida; en su calidad de asesor en geografía y navegación de los marineros y exploradores de la corona, Dee desempeñó un papel práctico en la historia. De ahí que se le llame matemático, aunque no aportó nada al progreso de las matemáticas y en el mejor de los casos se le puede calificar de maestro influyente en una isla aún atrasada. Desde una edad bastante temprana se interesó principalmente por lo que ahora podríamos denominar «investigación psíquica», bajo la protección de su médium particular o «vidente» Edward Kelley (Dee no pretendía estar familiarizado personalmente con los espíritus) y se convirtió en una figura fáustica que pasó largos años viajando por Europa, durante los cuales, según se ha sugerido, fundó la misteriosa secta de los Rosacruces. De un modo algo parecido a sir William Crookes al final de su vida, Dee abandonó la esfera de la materia y la ciencia para adentrarse en el reino fantasmal e invisible de los demonios y espíritus (ningún juicio más peligroso que aquel entre la verdadero y lo falso en este reino), separado del mundo material por un velo muy tenue y, pese a ello, impenetrable para la mayoría, un reino que tan fascinante y plausible resultaba para la mentalidad renacentista. A pesar de sus pretensiones místicas de

poder y sabiduría, sus *Monas hieroglyphicas* y (en momentos más racionales) sus planes para que la Britannia isabelina gobernase las olas, a pesar del interés que ha despertado en los eruditos de muchas épocas,[23] hay que suponer que Dee estaba bastante loco y que escribió gran cantidad de tonterías (no publicadas), mientras que Cardano y Paracelso, que publicaron más, muchísimo más, al menos expresaron algo de buen sentido y tal vez sólo estaban al borde del trastorno psíquico. Pero también ésta es una clasificación anacrónica; el Renacimiento sólo sabía de demonios, posesos, magos y místicos.

No hay que suponer que todos los innovadores, ya fueran racionales o, especialmente, irracionales, se salieran con la suya, aunque el éxito de Cardano, Dee y Paracelso pueda inducirnos a creerlo; por el contrario, las críticas eran fuertes y persistentes. Las que procedían de los defensores insulsos y convencionales de la sabiduría establecida, cual es el caso de los doctores de París, no planteaban importantes problemas de principio; eran sencillamente una defensa de la omnisciencia profesional. En cambio, las críticas que contra Paracelso lanzó Erastus (Thomas Liebler, 1523-1583), notable teólogo, fundadas en la visión que de los hechos y las palabras tenía un hombre sencillo, defienden vigorosamente el racionalismo cauto contra la imaginación excesiva.[24] Al mismo tiempo que por motivos teológicos aceptaba la existencia de demonios y brujas, Erastus consideraba que la magia se basaba en la demonología o en un concepto equivocado de la astrología: en este sentido condenaba tanto a Paracelso como a los neoplatónicos. Porque los cielos no son controlables por los hombres en su acción sobre la Tierra allá abajo; más bien actúan de acuerdo con una pauta regular, constante. Erastus critica la idea exagerada de la «química» que tiene Paracelso —puesto que la «química» no es un arte especial para controlar la naturaleza, sino simplemente una parte de la naturaleza— y su introducción de los tres principios químicos: aquí como en otras partes Erastus señala la incoherencia interna y la falta de lógica de las afirmaciones de Paracelso; en realidad, dice, la única idea lógica de un elemento es la que da Aristóteles: la menor parte de todas las cosas. Todo lo que decía Paracelso sobre remedios maravillosos extraídos de minerales se redu-

23. En el *Dictionary of scientific biography* se despacha a Dee en media página. Para Dee y los Rosacruces, véase Frances A. Yates, *The Rosicrucian Enlightenment*, Routledge, Londres, 1972.
24. W. Pagel, *op. cit.* (en nota 10), pp. 311-333.

cía simplemente a la sospechosa utilización de mercurio. Al parecer, Erastus es partidario del sentido común y de la sagaz valoración de la experiencia contra el lenguaje campanudo, la ampulosidad y la insensatez. Por lo tanto, los amigos de la innovación y la originalidad, ¿no son casi más peligrosos y absurdos que sus enemigos? Sin duda Erastus no era amigo de la revolución científica ni de una lógica nueva y, a pesar de ello, en muchos sentidos parece comprender el espíritu «científico», escéptico, de tiempos posteriores mejor que Paracelso. El dilema se parece mucho al que se dio en la política a mediados del siglo XX: con demasiada frecuencia el antifascista encuentra su mejor aliado en el comunista. Era muy probable que el crítico de los magos y alquimistas hablara con la misma voz que los negros reaccionarios clericales, tales como los teólogos que condenaron a Van Helmont por su apego a las doctrinas de Paracelso y por «pervertir la naturaleza atribuyéndole todo el arte mágico y diabólico y por haber propagado más que oscuridad cimeria por todo el mundo mediante su filosofía química».[25] ¿Podía aparecer la ciencia racional, experimental, sin aliarse con esta fuerza poderosa que también exigía libertad intelectual y el derecho de elegir nuevos métodos y sistemas?

La respuesta sigue siendo muy discutida. Muchos historiadores recientes dicen que tiene que ser negativa, al menos en parte, que el neoplatonismo, el hermeticismo, el paracelsismo —resumiendo, la magia— fueron esenciales para el desarrollo de la ciencia y el rechazo de la filosofía del pasado. Aparte de los numerosos defensores de lo esotérico y lo paracelsiano, algunos de los principales «filósofos nuevos» de Inglaterra y Alemania se inclinaron, al parecer, en la misma dirección: por ejemplo, Kenelm Digby, Robert Boyle, Leibniz y hasta Isaac Newton. Los franceses, católicos, matemáticos, cartesianos, lo evitaban en su mayor parte, aunque seguía habiendo «adeptos» y «espagiristas» franceses mucho después de morir Descartes. Por otro lado, hubo casos en que la tradición hermética fue rechazada con firmeza. Uno de los más célebres fue el de Kepler, platónico y admirador de Proclo, defensor de la astrología (según el modelo reformado por él mismo) e hijo de una mujer que en cierta ocasión había sido acusada de brujería. Su oponente era Robert Fludd (1574-1637), próspero médico londinense a la vez que hermético y ocul-

25. *Idem*, en DSB, VI, p. 254, col. 2, citando.

tista; la complejidad de las relaciones intelectuales la demuestra el hecho de que Fludd apoyara por razones místicas la circulación de la sangre descrita por vez primera por su amigo William Harvey (1627) basándose en datos anatómicos y experimentales. (Años antes el ingreso de Fludd en el Colegio de Médicos de Londres se había visto demorado a causa de su crítica de la medicina galénica; Harvey no criticaba la medicina tradicional. A una mente liberal y progresista de alrededor de 1620 es posible que Fludd le pareciera una figura mucho más progresista, apasionante y activa que Harvey.) En 1619 Kepler creyó necesario corregirle tanto en lo referente a la música como a la armonía celeste. En cuanto a la música, dice que Fludd ha escrito como músico, mientras que él lo ha hecho como filósofo y matemático; más importante, Fludd piensa que la armonía la explican los números; Kepler, que la explica algo que los números miden (las longitudes de onda, añadiríamos nosotros, pero todavía no eran conocidas). Asimismo, al buscar la armonía secreta del universo (que, curiosamente, para Fludd sigue siendo ptolemaica) los números del inglés para los reinos de la Tierra, el Agua, el Aire y el Fuego son meramente imaginarios, mientras que los números del alemán relativos al movimiento planetario proceden de la medición. La diferencia, expuesta brevemente, está entre la numerología y la física matemática.

Este era un problema esencial. Al mismo tiempo que resultaba esotérico para las personas que no sabían de números, el razonamiento matemático era esencial para la ciencia tal como se ha desarrollado para distinguir entre lo oculto y los esfuerzos racionales por matematizar la naturaleza. (Cuando Newton buscaba una analogía entre las divisiones de los colores del espectro y las armonías musicales, lamentablemente volvía a confundir las dos.) El numerólogo atribuye trascendencia a los números en todas partes, de su propia invención: en el uno, por ejemplo, porque es único; en el dos, porque todo viene en pares o lados; en el tres, porque es (como dijo Aristóteles) el número de las dimensiones; en el cuatro, porque (dice Fludd) todo puede dividirse en cuatro partes; en el cinco, porque es el número antiguo de los planetas; en el seis, porque es el primer número perfecto, y así sucesivamente. Entonces puede verse trascendencia en una infinidad de proporciones hechas con los números enteros. He aquí un ejemplo absurdo (pero cierto) de numerología: en la versión inglesa autorizada de la Biblia, en el Salmo 46, la palabra

cuadragesimosexta es *shake* (temblar) y la palabra cuadragesimosexta desde el final (omitiendo Selah) es *spear* (lanza). Shakespeare nació en 1564: obviamente, tomó parte en la traducción autorizada que se terminó en 1611, cinco años antes de su muerte. El orden inverso de las dos últimas cifras de la fecha de nacimiento (46 por 64) es indicado por el orden inverso de contar correspondiente al segundo elemento-palabra, *spear*. Sin embargo, puede que sea más típica la clase de argumento «místico» que se encuentra en *De Luce* («Sobre la luz», *c.* 1230), de Grosseteste —pues esta clase de absurdo era frecuente en la Edad Media—, donde la forma es representada por la unidad, la materia por el número dos, su composición por el tres y el compuesto resultante por el cuatro; dado que la suma de estos números es diez (un número triangular) «cada cosa completa y perfecta es diez».[26]

El ataque de Kepler contra Fludd fue apoyado por Marin Mersenne (1588-1648), un fraile mínimo cuyo nombre sería estrechamente relacionado con Descartes y el desarrollo de la filosofía mecanicista en Francia. Las críticas formuladas por Mersenne en 1623 también recibirían apoyo, contra las réplicas de Fludd, por el filósofo atomista Pierre Gassendi.[27] Mersenne condenó principalmente los argumentos cabalísticos de Fludd (que llevaban aparejada la transposición de letras en números para «probar» así las identidades entre palabras o nombres) y el animismo de la filosofía neoplatónica (y, de hecho, paracelsiana) que atribuía un alma a todas las cosas. La analogía microcosmos-macrocosmos era para él una simple invención engañosa e igualmente fabulosa era la idea de la «armonía del mundo» que Mersenne encontraba también, bajo otra forma, en Kepler. Más adelante, cuando ya era un copernicano como Kepler, Mersenne reconocería que la determinación de las constantes astronómicas efectuada por Kepler era exacta, aunque nunca quiso admitir que las esferas tuvieran música audible; pero tampoco lo admitió Kepler.

Mersenne no se opuso únicamente a Fludd ni mucho menos, toda vez que también condenó a varios filósofos italianos —entre ellos Giordano Bruno, Francesco Giorgio, Tommaso Campanella y Fran-

26. L. Thorndike, *History of magic and experimental science*, II, Columbia University Press, Nueva York (1923), 1947, p. 444. La peculiaridad del Salmo 46 me la señaló Charles Singer.

27. Robert Lenoble, *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, París, 1943, pp. 103-105, 367-370.

cesco Patrizzi— a los que tenía por naturalistas y animistas, probablemente también por deístas o libertinos, marcados todos ellos con la mancha hermética y cabalística. En este momento anterior a su encuentro con Descartes (1623 o 1624) Mersenne seguía fuertemente imbuido del espíritu de la reacción católica y todavía consideraba ateos a los atomistas lucrecianos. Su filosofía iba a sufrir pronto una revolución completa, pero jamás admitiría la magia. Así, alrededor del año 1620 la línea de división entre ciencia racional-matemática y mecanicista por un lado y una visión animista o mágica de la naturaleza por el otro fue trazada por fin, aunque apenas establecida; un hombre como Kenelm Digby, que defendía el «ungüento para el arma»,[28] estaría, a pesar del parecido entre su filosofía natural y la de Descartes o Hobbes, en el otro lado de la línea y probablemente Van Helmont también lo estaba. Como es obvio, esto no quiere decir que, una vez concluido este siglo de confusión, todo el mundo fuera consecuente, en uno u otro sentido. No fue así. Nadie sería más consecuente de lo que antes fueran (a nuestros ojos) Bacon, Kepler o Mersenne. Lo que ocurrió fue que alrededor de 1640 la ciencia matemática, mecánica y experimental adquirió fuerza suficiente para no necesitar apoyo de la magia o de otros tipos de esoterismo y también empezó a hablar con mayor confianza de su *propia* utilidad. Al finalizar el siglo XVII —mucho tiempo después de que Isaac Casaubon (1614) desacreditara la leyenda de Hermes Trimegisto y los antiguos padres de la sabiduría—, la astrología, la alquimia y la magia descenderían rápidamente al nivel de subculturas inferiores. Ya no eran respetables.

28. Fue descrita en 1608 por Rudolf Goclenius; el ungüento se aplicaba al arma y no a la herida que ésta había causado, y se suponía que curaba la herida por medio de su acción mágica a grandes distancias. Según algunos, para la eficacia del ungüento era esencial que en el arma hubiera sangre seca de la víctima. Digby describió su «poder de simpatía» (la misma cosa, en su caso simplemente una solución seca de vitriolo, sulfato de cobre) en una conferencia que pronunció en Montpellier en 1657 y que, una vez impresa, resultó muy popular.

Capítulo 4

LA NUEVA CIENCIA DEL MOVIMIENTO

Hasta las postrimerías del siglo XVI y exceptuando la medicina, el talante de las críticas e innovaciones científicas fue modesto, incluso humilde. Aunque Vesalio dijo cosas muy duras de Galeno por sus errores de descripción, había sido fiel a su esquema fisiológico incluso cuando éste parecía chocar con la observación; al igual que los botánicos, zoólogos como Pierre Belon (1517-1564), Conrad Gesner (1516-1565) y Guillermo Rondelet (1507-1566) destacaron principalmente por alcanzar una exactitud y una amplitud mayores en la parte descriptiva de la historia natural, mostrando escasa tendencia a criticar a su antiguo maestro, Aristóteles; de modo parecido también a aquellos que trataban de seguir el desarrollo inmaduro de las criaturas, el polluelo en el huevo o el animal embrionario en el útero. Girolano Fabrizi d'Acquapendente (*c.* 1533-1619) iba a publicar los mejores estudios renacentistas de embriología, volúmenes soberbios, magníficamente ilustrados, que alcanzaron un nivel de detalle muy superior al del modelo antiguo; pero la totalidad del pensamiento esencial es de Aristóteles.[1] Tampoco en las matemáticas hubo un conflicto entre el desarrollo espontáneo del álgebra por un lado y la exploración de la geometría y la mecánica, cuya inspiración era griega, por el otro. En filosofía hubo más disputas, toda vez que la escuela neoplatónica fue objeto de severas críticas por parte de conservadores como el médico lionés de princi-

1. Véase Howard B. Adelmann, *The embryological treatises of ... Fabricius*, Cornell University Press, Ithaca, 1942; el que trata del feto animal se publicó en 1604; el de la gallina, póstumamente en 1621.

pios del siglo xvi, Symphorien Champier (muerto en 1537), escritor multifacético que dio a la imprenta un *Diálogo de la destrucción de las artes mágicas* (1498?). Hubo también polémicas entre los llamados «averroístas» (esto es, filósofos que aceptaban el hecho de que Aristóteles enseñaba doctrinas paganas) y los aristotélicos cristianos que se escandalizaban cuando les decían que Aristóteles no creía en la inmortalidad del alma individual. Representante del primer grupo era Pietro Pomponazzi (1462-1525), que enseñó en Padua y en Bolonia, y que, al mismo tiempo que aceptaba la realidad de los poderes ocultos (entre ellos, curiosamente, la capacidad de algunas personas para mover las orejas a voluntad) se mostraba escéptico en lo que se refiere al poder de los magos para convocar a los demonios y hacerles cumplir sus órdenes: Pomponazzi afirmó que se conseguía mucho más por medio de la magia natural. Y más entrado el mismo siglo, hubo discusiones entre los seguidores de los que criticaban rotundamente a Aristóteles, como, por ejemplo, Ramus (p. 64) y los peripatéticos.

Fue en la medicina, más que en la ciencia y la filosofía natural, donde más fuertes fueron las polémicas en el siglo xvi, en las que se empleaba un lenguaje más apropiado para la lonja de pescado de Billingsgate que para el mundo académico. Vesalio no tenía pelos en la lengua cuando se trataba de expresar la opinión que le merecían sus rivales. Paracelso juraba que las hebillas de sus zapatos sabían más medicina que Galeno y Avicena y que su barba tenía más experiencia que los doctores de la universidad. Este lenguaje campanudo era típico de la época y de él se hicieron eco sus seguidores. Se libraron otras batallas entre arabistas y humanistas, entre (en la cirugía) cauterizadores y anticauterizadores (esta escuela más suave de tratamiento de las heridas la fundó Ambroise Paré, 1510-1590). Las nuevas drogas procedentes de las Américas eran atacadas y defendidas. La violencia en el lenguaje parecía una forma fácil de hacerse una reputación.

En la astronomía, que a nuestro juicio, ofrece un ejemplo más interesante e importante del conflicto entre antiguos y modernos, hubo poco ruido hasta el final del siglo xvi, en parte porque distaba mucho de estar claro, mientras no se pusiera en duda la «interpretación de Wittenberg», que hubiera necesidad de defender acaloradamente la postura tradicional. Que Lutero llamara «necio» a Copérnico no fue más que la reacción sencilla de un hombre ignorante; los

eruditos no le tenían por tal. El pedagogo inglés Robert Recorde (1510-1558) aconsejó a su «erudito» que no se precipitara a sacar conclusiones acerca de la aparente absurdidad del movimiento de la Tierra.[2] Nadie se percataba aún de que el *De revolutionibus* era una bomba destinada a destruir la antigua Casa del Saber y pocos percibían siquiera lo destartalada que en realidad era aquella estructura. De hecho, las tareas de demolición las inició el filósofo metafísico neoplatónico Giordano Bruno (1548-1600), que en la doctrina copernicana del Sol fijo encontró un fulcro conveniente para su palanca, sin tener interés ni competencia en la astronomía técnica en donde había sobresalido Copérnico. Bruno no tenía nada de científico, y por esta razón son tanto más sorprendentes su repercusión, su importancia histórica y su influencia última en el desarrollo de actitudes no científicas ante la ciencia. No debemos suponer que el mundo intelectual del siglo XVI se viera en seguida sacudido hasta las raíces por las críticas que sus pilares recibieron de hombres como Copérnico, Vesalio y Paracelso. Hacía siglos que dicho mundo era escenario de debates y disensiones, de demandas de cambio y perfeccionamiento. No hubo jamás, en ninguna rama del saber, una época de fijeza monolítica. Los hombres aún no tenían la impresión de que hubiera llegado un momento de crisis o de revolución en el que todos los argumentos, descubrimientos o demostraciones tuvieran que considerarse favorables o contrarios a la tradición. Sólo los paracelsistas adoptaron una postura tan radical. La mayoría de los estudiosos veían la continuación de un proceso de cambio gradual en el contenido de libros y lecciones, a medida que el trigo se separaba de la paja en la cosecha de la innovación. Sólo cuando las propuestas restringidas formuladas por Copérnico (debilitadas por los expertos de Wittenberg) fueron inmensamente ampliadas por la burbujeante imaginación filosófica de Bruno, revelando una visión de mundos infinitos, almas infinitas, Redentores infinitos, y cuando Galileo (unos veinte años después de Bruno) procedió a pintar una visión observada, totalmente nueva, del cosmos en el que se movía la Tierra de Copérnico, sólo entonces asumió la innovación un carácter masivo, amenazador. La crisis se produjo en 1615-1616 y de nuevo en 1633 cuando las autori-

2. *In the Castle of Knowledge* (1556). Recorde dice que Copérnico «ha renovado la opinión de Aristarco de Samos» y que fue quizás el primero en hacerlo: «la comprensión de esta polémica depende de un conocimiento más profundo del que en esta Introducción puede expresarse convenientemente».

dades responsables de la iglesia católica vieron claramente que la síntesis de teología y filosofía que había servido al cristianismo desde tiempos de Agustín se veía seriamente puesta en duda. Como es natural, los católicos no fueron los únicos cristianos a quienes inquietó la idea de una Tierra que daba vueltas, que giraba —los famosos versos de John Donne prueban lo contrario—,[3] pero el papado fue la única organización religiosa que trató de suprimir el copernicanismo. Su política floreció sólo en Italia; Johannes Kepler, copernicano protestante, fue tolerado en la católica Austria y si bien los franceses expresaron cierto temor natural ante la condena de Galileo, ninguno de ellos sufrió por profesar creencias copernicanas.

La persecución inmortalizó el nombre de Galileo; sus asombrosos descubrimientos astronómicos de 1609-1610 ya lo habían hecho conocido; sin embargo, en lo que hace a pura calidad intelectual e importancia, sus investigaciones del movimiento superan todo lo demás. Aunque el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas* se leyó mucho en latín e italiano (y se tradujo a otras lenguas) y tuvo muchísima influencia —fue el único libro de Galileo que sabemos que Newton leyó, por ejemplo—, el libro no contenía ningún mensaje de importancia comparable para el futuro de la ciencia: su estructura polémica, modelo para todas las épocas, tenía significado sobre todo para su propia época. Sin embargo, no debemos olvidar que las dos ramas de la actividad transformadora de Galileo, la astronomía y la mecánica, estaban firmemente unidas; de hecho, el *Diálogo* de 1632 ya exponía los elementos de la mecánica galileana. Pues sólo una comprensión clara de los verdaderos principios del movimiento, que Galileo había alcanzado por vez primera, podía acabar con los reparos aparentemente fatales contra el movimiento de la Tierra, mientras que (por otro lado) sólo una visión «copernicana» del universo podía ser consonante con el nuevo conocimiento de la Luna y los planetas que Galileo había adquirido. Aunque a primera vista los dos campos de investigación cultivados por Galileo parecen muy separados, en realidad se observa una unidad en toda su actividad creativa: además de su instrumentalismo característico (mediante el empleo de telescopios, termoscopios, péndulos, planos inclinados, cuerpos flotan-

3. John Donne, *An anatomy of the world*, 1611, contiene versos que se citan a menudo y empiezan así: «Y la Nueva Filosofía lo pone todo en duda, / El Elemento Fuego está completamente apagado; / El Sol está perdido, y la Tierra, y el ingenio de ningún hombre / Puede indicarle dónde ha de buscarlo ...».

tes, etcétera), hay una unidad filosófica más honda en el realismo de Galileo —las propiedades de los cuerpos naturales son determinadas, demostrables y explicables— y, especialmente, en su aspiración a una filosofía única y consecuente de la naturaleza. El gran principio sobre el que edificó —mucho más profundo que su aforismo de que el lenguaje de la ciencia es la geometría porque el libro de la naturaleza está escrito en cuadrados, triángulos, etcétera— fue el principio de la homogeneidad física del universo. Hay diferencias locales, obviamente: la tiza difiere del queso; la superficie del Sol, de la superficie de Júpiter; pero a los ojos de Galileo la misma materia existe en todas partes, las mismas definiciones del movimiento son válidas en todas partes, ningún lugar es más privilegiado o singular que otro. Vista desde nuestra perspectiva, esta unificación parece un corolario inescapable del copernicanismo, pues si la Tierra es un planeta, los otros planetas pueden ser Tierras y el Sol puede ser una estrella como otras estrellas (como, al parecer, aceptaron sin dificultad varios astrónomos de finales del siglo XVI). Pero, de hecho, todavía nadie había visto y obedecido la unidad de la naturaleza como hacía Galileo, a menos que hagamos alusión a Giordano Bruno. Ciertamente, Bruno se dio cuenta de que los copernicanos abrían una puerta a la pluralidad de los mundos (una puerta a través de la cual Galileo se negó firmemente a mirar), pero no examinó el principio de unidad dentro de un solo mundo, que era lo que importaba a Galileo. Obsérvese que donde difieren estos dos filósofos es en la *utilización* de este principio: Galileo lo emplea para justificar el universo copernicano; Bruno, para proyectar el alma a través de universos infinitos. Pero, aunque la utilización del principio por Galileo es científica, el principio en sí es tan metafísico como el dualismo de Cielo y Tierra tan cuidadosamente argumentado por Aristóteles. No hacía falta *probarlo.* Hubiera sido como argüir que el Sol no es más que un gran fuego de carbón y no es preciso pensar mucho para comprender que no puede serlo; el calor celeste y el calor terrestre sólo podían considerarse equivalentes en el siglo XX.

En los últimos años ha aparecido otra distinción entre los dos campos de investigación de Galileo como resultado de las investigaciones de Stillman Drake. Galileo comunicó sus descubrimientos al mundo pocos meses después de hacerlos con el telescopio primitivo: he aquí, dijo, lo que acabo de ver. Ciertamente, en la obra de madurez *Diálogos sobre los dos máximos sistemas* el argumento favorable

a Copérnico se presenta de manera compleja y el «nuevo» sistema solar tiene un papel relativamente pequeño en él. En cuanto a la mecánica, en las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (1638) no hay ni rastro de semejante base fundada en la experiencia. No obstante, ahora sabemos que existía: a lo largo de varios años Galileo había realizado experimentos sistemáticos para elucidar las propiedades de los cuerpos móviles. Sin embargo, no mencionó ni utilizó tales experimentos, aunque reclamó con orgullo la propiedad de los descubrimientos realizados con el telescopio, que fueron fruto de la casualidad. Lo abandonó todo por una presentación puramente axiomática, tal vez con el objeto de seguir el modelo de Arquímedes. En cierto sentido obró justificadamente, pues a muy pocos hombres se les da la oportunidad de dictar los axiomas de una ciencia nueva.

A diferencia de sus predecesores, Galileo asumió conscientemente la actitud de publicista y partidista. Escribiendo más a menudo en su toscano natal que en latín (pues fue uno de los que dieron ejemplo abandonando, al escribir sobre ciencia, el lenguaje académico oficial), presentó sus argumentos de una forma que resultara comprensible a un público muy amplio. Sus diálogos eran animados, su ironía era mordiente y no vacilaba en presentar argumentos debatibles en su propia causa. Exageraba con entusiasmo los puntos flojos de la ciencia convencional con el fin de ridiculizarlos. El matemático Arquímedes fue casi el único personaje antiguo al que Galileo condenó; a Aristóteles lo trató principalmente como un ignorante sin sentido de la lógica, como si la sutileza y la complejidad de la mente aristotélica hubieran compuesto fantásticos tejidos de artificialidad al mismo tiempo que permanecían ciegas a las sencillas verdades de la naturaleza. Galileo era un modernista, de ello no cabe la menor duda. Se percataba de la falsedad de las creencias comunes; al parecer, este escepticismo se remontaba a sus primeros años. La actitud crítica que se hace evidente en sus «juvenilia» fue el semillero de sus posteriores ideas originales. Nacido en 1564, estudió matemáticas a pesar de la oposición de su padre (que deseaba imponerle la profesión de médico, pues le parecía más segura) y en 1589 ya enseñaba en la universidad de Pisa. Dos de las anécdotas más famosas acerca de sus extravagantes actividades datan de sus años en Pisa: allí observó la igualdad en el tiempo entre los grandes y pequeños balanceos de las lámparas de la catedral y allí llevó a cabo, desde la torre inclinada,

el famoso experimento consistente en dejar caer pesas grandes y pequeñas que chocaban contra el suelo al mismo tiempo. La opinión moderna parece mostrarse más favorable a la veracidad de estas anécdotas que la opinión de hace cincuenta años y ahora estamos seguros también de que fue en Pisa donde Galileo empezó a interesarse por la medición del movimiento y tal vez a experimentar, aunque la fase crítica de sus experimentos relativos al movimiento sería entre 1604 y 1609. A diferencia de la mayoría de los académicos de su época, Galileo nunca dejó de ser seglar, aunque no se casó. Al cabo de sólo unos pocos años, en 1592, obtuvo un nuevo empleo en Padua por el triple de lo que cobraba en Pisa; según sus discípulos y su biógrafo Vincenzo Viviani, el cambio se debió a la animosidad de sus colegas y a una intriga cortesana contra él. Aunque para Galileo significaba exiliarse de su amada Toscana (adonde volvía casi todos los veranos para pasar las vacaciones), la universidad de Padua se encontraba en el estado anticlerical de Venecia; sin duda, Galileo esperaba prosperar mejor en un ambiente más libre y ciertamente hizo muchos amigos íntimos entre los hombres de opiniones liberales, uno de los cuales era Paolo Sarpi (1552-1623), cabeza de su Orden, pese a lo cual fue excomulgado por apoyar a Venecia contra el papado. En Padua puso Galileo los cimientos de toda su futura labor sobre mecánica y también obtuvo cierto éxito como maestro, pero no se hizo famoso hasta casi el final. Sin embargo, logró el éxito que buscaba desde hacía tanto tiempo gracias a la construcción de un telescopio perfeccionado, a raíz de las noticias sobre un catalejo traído de los Países Bajos a Venecia, y de los descubrimientos astronómicos que hizo con él. Venecia le recompensó generosamente, pero Galileo optó por regresar a Florencia en 1610 bajo el patronazgo especial del gran duque. Desde aquel momento hasta 1633 permaneció totalmente entregado a la defensa de sus descubrimientos y de la hipótesis copernicana, lo cual terminaría con su proceso y condena en Roma por publicar el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas*. Sólo entonces, después de un cuarto de siglo, volvió Galileo a «hacer la crónica» de sus primeras investigaciones del movimiento; el resultado de las mismas incluía un texto en latín cuyo borrador es muy posible que fuera escrito en Padua poco antes de que por primera vez le hablasen del telescopio. El resultado fueron las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (1638).

Cuenta Viviani, su biógrafo, que ya en Pisa era consciente Galileo

de la necesidad de conocer de verdad la naturaleza del movimiento con el objeto de investigar los fenómenos naturales y que, en vista de ello, «se entregó a su estudio» siguiendo el ejemplo que diera Aristóteles en su *Física*. Pero es obvio que Galileo no tomó el texto aristotélico como punto de partida, ya que se propuso refutar varios pormenores del mismo, sino que partió de las versiones que existían entonces (siglo XVI) de la filosofía natural del siglo XIV. Como mínimo tres de los profesores de Pisa durante la época en que Galileo estudió allí —Girolamo Borri (1512-1592), Francesco de' Vieri (fl. 1550-1950) y Francesco Buonamici (muerto en 1603)— publicaron libros sobre la filosofía del movimiento (el de Buonamici es extensísimo) y seguramente también daban clases sobre el tema. Galileo conocía igualmente la obra de Tartaglia (p. 122), de Francisco Toledo (1532-1596) y de Giambattista Benedetti (1530-1590); los dos últimos eran autores de sendos *Comentarios* sobre la *Física* de Aristóteles. De hecho, es muy dudoso que Galileo conociera *de primera mano* la filosofía natural de la Edad Media; las ideas que había recibido estaban modificadas, simplificadas y aumentadas por los sucesivos expositores de las mismas.[4] Entre 1586 y 1591 Galileo redactó varios borradores de una obra, *De motu* (que no terminó ni se imprimió hasta el siglo XIX), en la que comentaba como filósofo las causas de los atributos (supuestos) del movimiento: por ejemplo, ¿por qué el movimiento natural (de caída) es más rápido al final que al principio, mientras que ocurre lo contrario en un movimiento violento (hacia arriba)? Otro ejemplo: ¿queda una piedra momentáneamente en reposo entre el ascenso y el descenso? Por supuesto, el método de Galileo no es matemático, pero se observa que su contenido de índole matemática tiende a aumentar de un borrador a otro. Galileo «prueba» que en el mismo medio todos los objetos de la misma sustancia caen a la misma velocidad (el teorema de la torre inclinada), como Benedetti había hecho antes; arguye que en el caso de materiales diferentes la velocidad de caída está relacionada con la proporción entre la densidad del material y la densidad del medio (así, la ligereza del corcho hace que caiga más despacio en el aire que la piedra y que flote en el agua, donde una piedra se hunde más lentamente que el plomo). El movimiento violento hacia arriba de

4. Christopher Lewis, *The Merton tradition and kinematics in late 16th and early 17th century Italy*, Padua, Antinore, 1980, especialmente el cap. VI.

los cuerpos pesados lo atribuye a una «ligereza artificial» (sigue pensando que el fuego es «naturalmente ligero»): la ligereza artificial la ocasiona una fuerza o *impetus*. Un pasaje muy interesante del libro trata —incorrectamente— de relacionar la velocidad con que un cuerpo se desliza hacia abajo por un plano inclinado sin fricción con su velocidad de caída vertical desde la misma altura: están en proporción inversa a las longitudes de las líneas.[5]

En su casa de Padua Galileo alojaba a estudiantes en calidad de huéspedes y daba clases particulares a jóvenes de la nobleza y de otras clases sociales (durante mucho tiempo se creyó que Gustavo Adolfo de Suecia, el gran rey guerrero, era uno de sus alumnos, pero no es cierto). Disertaba sobre la esfera celeste, la fortificación y la mecánica práctica. Los ingenieros y artesanos italianos habían destacado en estos dos últimos campos desde el siglo XV; el propio Galileo patentó algunas máquinas, amén de demostrar su ingenio de otras maneras. Alrededor de 1596 escribió un tratado, *Mecaniche* (*Sobre la mecánica*), que también aborda el problema del plano inclinado: esta vez Galileo nos dice que la fuerza que actúa hacia abajo de un cuerpo sobre el plano es a su peso como la altura del plano es a su longitud: regla parecida a la de las velocidades. Aún más interesante es la primera sugerencia del principio restringido de la inercia: sobre un plano horizontal, sin fricción, un cuerpo conservaría su movimiento indefinidamente y, cuando se encontrara en reposo, un mínimo de fuerza bastaría para moverlo.[6]

Cuando vuelven a aparecer pruebas concluyentes de los pensamientos galileanos sobre el movimiento, unos seis años después (1602), vemos que había hecho considerables progresos. Durante este intervalo —o, de hecho, algo más tarde— puede que se sintiera estimulado por el interés que su patrón, el marqués Guidobaldo del Monte (1545-1607), sentía por la trayectoria de los proyectiles. Guidobaldo, discípulo y amigo de Commandino (p. 118) en Urbino, era en aquel tiempo la principal autoridad euorepa en los campos del momiviento y la mecánica, favoreció siempre a Galileo y tuvo que ver con su traslado a Padua. Sin embargo, Guidobaldo era más

5. A decir verdad, la caída vertical y el equivalente descenso sin fricción de un plano inclinado terminan con la misma velocidad instantánea, y la velocidad media (distancia/tiempo) es la misma en cada caso también. De aquí que los tiempos empleados equivalgan a las distancias, cosa que Galileo probó más adelante.

6. Este principio no lo enunció explícitamente Galileo hasta su *Diálogo* de 1632.

conservador en muchos aspectos; por ejemplo, enseñaba, de acuerdo con la experiencia cotidiana, que se necesita más fuerza para iniciar un movimiento que para continuarlo de manera uniforme. En 1602 Galileo escribió a Gidobaldo (evidentemente, como parte de una correspondencia más extensa) para comunicarle su descubrimiento del isocronismo del péndulo (la duración de cada balanceo es independiente de su amplitud); reconocía que le era imposible demostrarlo matemáticamente y mostraba a Guidobaldo cómo podía verse experimentalmente, pero podía probar algo análogo: que los descensos a lo largo de todas las cuerdas hasta la base de un círculo vertical son isócronos.[7] En aquel entonces Galileo, al igual que todos sus contemporáneos, ignoraba la importancia de la aceleración en el movimiento, pues, como todo el mundo desde Aristóteles, tendía a asociar la fuerza («el empuje») con la continuación de un movimiento uniforme.

El siguiente hito es una carta a Paolo Sarpi fechada en octubre de 1604. En ella encontramos grandes noticias: la ley de la caída de los graves; las distancias caídas aumentan como el cuadrado de los tiempos requeridos, podrían ser 16, 64, 144... pies en 1, 2 y 3 segundos. Esta regla, por supuesto, también la conocían Oresme (aunque éste no la aplicaba a cuerpos reales) y Domingo de Soto. ¿Cómo la descubrió Galileo? Parece ser que en 1603 llegó a la conclusión de que lo que importaba saber acerca del movimiento sobre planos inclinados no era la velocidad media de descenso —relacionada con la longitud y el tiempo total requerido para planos de la misma altura vertical—, sino más bien *la forma en que la velocidad aumentaba*, esto es, las distancias recorridas en sucesivos intervalos iguales de tiempo. Stillman Drake ha encontrado pruebas de que Galileo se propuso averiguar esto por medio de experimentos, utilizando su sentido musical (su padre había sido músico profesional) para establecer los intervalos y una inclinación muy gradual para que fuera posible señalar la posición en los tiempos sucesivos. En un manuscrito que Drake data en 1604 aparecen los siguientes números: (1) 33, (2) 130, (3) 298, (4) 526... ocho en total, que Drake interpreta como medidas experimentales, y obviamente siguen de cerca la serie de 1, 4, 9, 16...

7. Stillman Drake, *Galileo at work, his scientific biography*, University of Chicago Press, Chicago, 1978, pp. 69-71. Drake arguye (pp. 55-56) que la versión final de *Sobre la mecánica* fue escrita en 1600-1602. Obviamente, Galileo entró en un período nuevo de gran interés por este tema más o menos en aquellas fechas.

de los cuadrados. Sin embargo, aunque resulte curioso, puede que en el año anterior Galileo ya hubiese observado su «regla de la velocidad doble», esto es, la regla según la cual un cuerpo que se haya acelerado desde el reposo en A por la pendiente AB cubriría, en el mismo tiempo cuando se moviera uniformemente a lo largo del plano horizontal DC, una distancia BC = 2AB. El argumento se parece mucho al que justifica la equivalente «regla de Merton»: Galileo dice que «todas las velocidades (en aumento) cada una en un punto» serán a las velocidades uniformes del máximo valor (esto es, la velocidad en B tomada en todos los puntos) como un triángulo rectángulo es a un cuadrilátero de los mismos lados, esto es, como uno a dos.[8] Partiendo de esta «regla», como hemos visto antes, puede generalizarse en seguida la serie de números impares y, por ende, la ley del cuadrado del tiempo para los cuerpos que caen. Al parecer, Galileo no hizo esto, ni da más explicaciones sobre la fuente de su argumento de la «velocidad doble». No obstante, podemos estar bastante seguros de que Galileo no se limitó a tomar en préstamo y aplicar la «regla de Merton» medieval, que él redescubrió y volvió a utilizar en sus *Consideraciones*. La «regla de Merton» la habían olvidado los filósofos del norte de Italia, quienes incluso «ignoraban en gran parte las ideas de la tradición de Merton o, en el mejor de los casos, mostraban por ellas una antipatía superficial y mal informada». Si Galileo les debía algo a los filósofos de Oxford, es muy posible que no fuera un cálculo, sino la idea de la velocidad como una intensidad de movimiento, continuamente variable.[9]

Fueran cuales fueran los detalles exactos, es seguro que Galileo seguía ya una línea muy independiente y, lo que es más, estaba creando de nuevo el lazo entre las matemáticas y el movimiento que había permanecido cortado durante tanto tiempo; asimismo, empezaba a darse cuenta (según parece) de que dicho lazo podía explorarse geométricamente, mediante el desarrollo de una serie lógica de proposiciones, y no en disquisiciones meramente verbales.

No obstante, como explicaba Galileo en su carta de 1604 a Paolo

8. Drake, *ibid.*, pp. 82, 86-90; *idem*; *Galileo's notes on motion* (Monografia n.° 3 dell' Istituto e Museo di Storia della Scienza, Firenze), Florencia, 1979, pp. 19, 23. *Two new sciences*, p. 196. Las investigaciones realizadas por Drake a lo largo de muchos años han modificado y enriquecido en gran medida nuestro conocimiento de la mecánica de Galileo. Especialmente: ha aportado pruebas irrebatibles de los experimentos que Galileo llevó a cabo.

9. Lewis, *op. cit.* (en nota 4), pp. 280, 282.

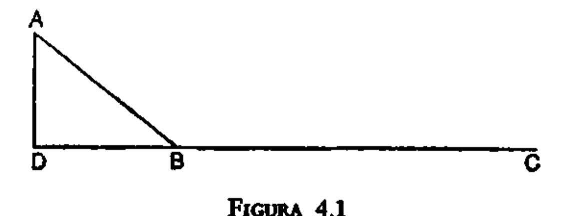


FIGURA 4.1

Regla galileana de la «velocidad doble»

Sarpi, distaba mucho de satisfacerle el proponer la ley de los cuerpos que caen ($s \alpha t^2$) como una generalización empírica, aunque no tenía ninguna duda de su veracidad; creía, y podemos considerar que acertadamente, que para ser convincente y satisfactorio desde el punto de vista intelectual debía ser capaz de probar que esta generalización nacía de una buena teoría del movimiento. ¿Cómo podía pretender que medía un movimiento (en aceleración) si no sabía cómo definir un movimiento en aceleración? Ocurría lo mismo que con su «regla de la doble velocidad», la cual le daba el equivalente a un movimiento acelerado pero le dejaba en la ignorancia de sus propiedades. Supiera lo que supiera de la tradición de Merton, no tenía la impresión de que ello le proporcionase un argumento que pudiera utilizar inmediatamente para justificar su ley de la caída, como había hecho De Soto, y, por lo tanto, no explicó el razonamiento justificativo de la «regla de la doble velocidad». En vez de ello, siguió una línea análoga pero diferente (y equivocada): podía definir un movimiento acelerado uniformemente como un movimiento en el que la velocidad en cualquier punto B es proporcional a la distancia AB desde el punto de origen A. Que Galileo no percibiese la discrepancia entre esta «ley de la distancia» de la aceleración y el principio al que había llegado a tientas y según el cual el cambio de movimiento es continuo parece tan extraordinario como el que ignorase la convergencia de sus propias ideas con las de los filósofos medievales. Porque, según la ley de la distancia, si un cuerpo posee un grado de movimiento, por pequeño que sea, tiene ya que haberse movido una distancia, por pequeña que sea; o a la inversa, por despacio que se mueva, un cuerpo no puede detenerse por completo sin una discontinuidad, una sacudida, porque se acercaría a su punto de parada de un modo infinitamente lento. Se trata del mismo caso que la paradoja de Zenón sobre Aquiles y la

tortuga. De momento, sea como sea, Galileo dio a Sarpi la seguridad de que la ley de la caída podía deducirse matemáticamente de esta ley de la distancia. Desde hace tiempo se conoce un manuscrito que contiene esta pretendida y muy extraña demostración; supone que la velocidad *media* de caída también aumenta con el cuadrado de la distancia caída, esto es, como la cuarta potencia del tiempo requerido.

Siguieron luego cinco años críticos. Al finalizar dicho período, Galileo había rechazado por completo la ley de la distancia de la aceleración y adoptado en su lugar una ley del tiempo: la velocidad del cuerpo en cualquier instante es proporcional al *tiempo* transcurrido desde el comienzo de la aceleración. La fecha está fijada en cartas, especialmente en una de febrero de 1609 dirigida a Antonio de Médicis en Florencia y en la que Galileo habla de su nueva teoría de que los proyectiles describen parábolas, y en otra (junio de 1609) al matemático Luca Valerio (*c.* 1552-1618); ésta se ha perdido pero puede reconstruirse partiendo de la contestación de Valerio (en julio). Ambas nos informan de que Galileo estaba escribiendo un tratado sobre el movimiento, empezando por el movimiento acelerado sobre planos inclinados. Está claro que los manuscritos «fechables» que se ocupan de todos estos temas son del período paduano, antes de que Galileo iniciara sus estudios con el telescopio; por ellos nos enteramos de su gran interés por el movimiento de los proyectiles, así como de los experimentos que hacía al respecto y en los que no usaba ballestas ni armas de fuego, sino bolas que hacía deslizar por un plano inclinado. Posiblemente le estimulaban los puntos de vista de Guidobaldo del Monte, fruto también de la experimentación, de que las secciones «arriba» y «abajo» de la trayectoria eran rigurosamente simétricas y que la curva que así se formaba era como una parábola o catenaria.[10] Pero no hay pruebas de que estas opiniones (no publicadas) fueran impartidas a Galileo, cuyos experimentos eran ciertamente distintos. En todo caso, para simplificar una historia compleja, de las cuidadosas mediciones Galileo sacó la conclusión de que la curva es una parábola, siendo uniforme el componente horizontal del movimiento y acelerada la vertical de acuerdo con la ley de la caída de los cuerpos.[11]

10. R. H. Naylor en *Physis*, 16, 1974, e *Isis*, 71, 1980.

11. Es imposible establecer más allá de toda duda el significado y el orden precisos de las notas manuscritas. Las interpretaciones de los eruditos también difieren mucho en detalle; véase Drake, *op. cit.* (nota 8), Naylor, *op. cit.* (en nota 10 y en

Interpretados a la luz de la ley de la caída, estos experimentos proporcionaron a Galileo números reales y figurados que aplicar al tiempo, la velocidad y la distancia en el movimiento acelerado; estos números podía someterlos a pruebas para ver si concordaban con sus otras ideas, tales como, por ejemplo, la (falsa) ley de la distancia. De esta manera —los eruditos discrepan en torno a los detalles precisos— Galileo se convenció de que la ley de la distancia requería que la proporción de incremento de velocidad de un cuerpo que cae sea mayor de lo que es y que la velocidad media no esté relacionada con la cuarta potencia del tiempo, sino directamente con el tiempo. Al clarificar su pensamiento y sus métodos de cálculo, por fin comprendió plenamente que el tiempo es la base esencial, es decir, «la afinidad suprema de tiempo y movimiento». A pesar de que este hecho ya lo conocían los filósofos medievales, Galileo fue indudablemente el primero en utilizar esta verdad como fundamento de una teoría organizada de los movimientos de los cuerpos reales: así es cómo la formuló en las *Consideraciones* de 1638:[12] «Diremos que un movimiento es igual o uniformemente acelerado si, abandonando el reposo, se agrega a sí mismo momentos iguales de velocidad en tiempos iguales». También adoptaría como postulado (puesto que no conocía ninguna forma de probarla) una equivalencia que ya hemos dicho que aparecía en su estudio de los planos inclinados: la velocidad adquirida por un cuerpo al descender desde una altura dada (sin fricción) es la misma, sin que importe el ángulo de descenso. Este argumento lo formuló partiendo de lo que en esencia es la conservación de la energía cinética. Basándose en estos cimientos y obteniendo ahora la ley de la caída mediante un razonamiento que entrañaba en esencia su «velocidad doble» o la antigua «regla de Merton», Galileo pudo exponer la ciencia del movimiento en una serie ordenada de proposiciones geométricas.

Difícilmente se puede discutir el punto de vista de que «sólo por medio de un proceso repetido de comparación de teoría y experimento y el análisis de la teoría pudo Galileo llevar su labor a una feliz con-

---

otras partes) y W. Wisan en *Archive for the History of Exact Science*, 13, 1974. Nadie duda que, como descubrió Drake por primera vez, los experimentos se hicieron y moldearon los pensamientos de Galileo.

12. Galileo Galilei, *Two new sciences...*, trad. con introducción y notas de Stillman Drake, Wisconsin University Press, Madison, 1974, p. 162.

clusión».[13] Sin duda también es cierto que la buena suerte tuvo que ver con ello, al igual que con tantos éxitos. Galileo tuvo éxito gracias a *dos* series de experimentos cuidadosamente planeadas —esto no lo sabíamos diez años atrás, antes de que Stillman Drake examinara una serie de papeles olvidados, de aspecto poco prometedor, que había en Florencia— haciendo una serie de cómputos (algunos casi del tipo de las aproximaciones sucesivas) y pensando en la compatibilidad de una generalización con otra. No sabemos exactamente cómo razonaba Galileo, con qué palabras hubiera expresado sus ideas o procesos, porque las páginas críticas carecen de prosa explicativa y porque, si bien es razonable suponer que todo ello data del período de Padua (1605-1609), es imposible conocer el orden con certeza. Es probable que al principio Galileo siguiera el ejemplo de los astrónomos antiguos y sólo tratara de «salvar los fenómenos» o construir un algoritmo, pues esto es en realidad su «regla de la velocidad doble». Así, en su *Tratado sobre la esfera*, Galileo traza una distinción entre el filósofo que considera las cualidades de las cosas y el científico matemático que se ocupa de fenómenos observados, hipótesis estructurales y demostraciones geométricas; como primer paso era suficiente y, de hecho, era una gran cosa tratar el movimiento sólo de esta manera.[14] En la medida en que su tema fue siempre la descripción del movimiento (cinemática) y no la acción de las fuerzas que lo producen (dinámica), Galileo nunca renunció del todo a esta limitación: en las *Consideraciones* (1638) insistiría en que las cuestiones relativas a la causa de la aceleración natural debían rechazarse en aras de las cuestiones relativas a sus «atributos». Pero, huelga decirlo, este rechazo de la causa de la fuerza no significa que Galileo no preste la menor atención a la fuerza en el movimiento, ni que no necesite formular lo que quería decir con «velocidad» (uniforme o no uniforme), «igual» (en términos de velocidad o movimiento), «instantánea» y «media» aplicados a la velocidad, el *momentum*, etcétera. Esto no son fenómenos observados ni hipótesis estructurales (como el rayo de luz o las esferas astronómicas de los antiguos), sino conceptos, y

13. R. H. Naylor, *Isis*, 71 (1980), p. 570. Hasta hace poco muchos historiadores, incluyéndome a mí mismo, tenían una visión mucho más «idealista» del proceso de descubrimiento de Galileo. Parecía ser un científico teórico en vez de un científico inductivo. Nos equivocábamos: Galileo descubrió principios fundamentales basándose en lo que Bacon o Newton habrían denominado «inducción partiendo de experimentos». Los más importantes de éstos no se describen en sus escritos publicados.

14. Drake, *Galileo at work* (en nota 7, arriba), p. 52.

en la medida en que redefinía conceptos Galileo actuaba ciertamente como filósofo de la naturaleza y no como matemático. La geometría no podía venir hasta más tarde, o ser útil en el proceso de desarrollo de conceptos. El propio Galileo no despreciaba el título de «Filósofo» a pesar de sus discusiones con los numerosos aristotélicos que lo ostentaban; a decir verdad, afirmaba servir al gran duque en calidad de filósofo y decía que había dedicado muchos más años a la filosofía que a las matemáticas.

Por consiguiente, en sus *Consideraciones* de madurez Galileo no ofrece un algoritmo que permita ocuparse de hipotéticos planos inclinados, sino un análisis del movimiento acelerado «que la naturaleza emplea», como indican «lo que los experimentos físicos muestran a los sentidos» y «la consideración de la costumbre y el procedimiento de la propia naturaleza en todas sus otras labores».[15] Desde luego, Galileo no dice más que Newton sobre qué es la «gravedad» (en el sentido de causa de la pesadez), ni explica por qué el cuerpo pesado desciende hacia el centro de la Tierra (por hacer esto lo llamamos «grave», y también la «gravedad», como dice Galileo, es sólo un nombre). Aunque emplea muchos términos dinámicos (gravedad, fuerza, *momentum*, colisión). Galileo, pese a que Newton creía lo contrario, nunca generalizó una proporcionalidad entre fuerza y aceleración ($f = ka$); de hecho, se limita conceptualmente a una fuerza y una aceleración constantes, a lo que es «natural» aun cuando (de hecho) hace que ambas sean variables por medio del plano inclinado. Que Galileo luchaba constantemente con problemas de teoría y explicación lo evidencian sus cartas a Guidobaldo (en las que explica que no acaba de explicarse teóricamente la ley de la caída). Asimismo, es evidente que a veces no lograba encontrarles un sentido inmediato a los datos que obtenía de sus experimentos; tenía que recurrir a la deducción para encontrar la pauta con sentido, por ejemplo, la parábola. Finalmente, es innegable que del mismo modo que Arquímedes construyó una teoría de la estática, Galileo construye una teoría del movimiento. Del mismo modo que Arquímedes idealizó necesariamente los conceptos de equilibrio o de fluido perfectos, Galileo tuvo que geometrizar (perfeccionar) la realidad física de los planos inclinados y los péndulos. Y el realismo —a pesar de esto— de la estática de Arquímedes y de la cinemática de Galileo se justifica por

15. Galileo, *op. cit.* (en nota 12), p. 153.

medio de experimentos. Sin duda es significativo que Galileo, al igual que Arquímedes y, para el caso, que los autores griegos de obras sobre óptica y astronomía, prefiera una exposición axiomática a una exposición inductiva: no nos dice cómo averiguó las cosas mediante experimentos, sino que se limita a explicarnos cómo se valió de los experimentos para confirmar la veracidad de lo que ya sabía. Cuando leemos las *Consideraciones* de Galileo no nos enteramos de cómo descubrió las proposiciones que contiene el libro, pero sin duda averiguamos algo acerca de sus ideas sobre la naturaleza metodológica de la ciencia, palabra que aquí no significa el proceso de descubrimiento, sino un conjunto de conocimientos comunicables. De hecho, aún no se había promulgado el supuesto ideal de la ciencia, rechazado implícitamente por Galileo, como fruto de la simple inducción.[16]

Si comparamos a Galileo con Aristóteles en lo relativo a movimiento, la simple consecución de un algoritmo o incluso de una ley que sirva para medir el movimiento acelerado no señala una gran diferencia entre los dos. Nada induce a creer que a Aristóteles le hubiera sorprendido la idea de medir velocidades variables o uniformes, o que hubiese encontrado irregulares las manifestaciones de la aceleración natural. De modo parecido, la veracidad de la afinidad entre tiempo y movimiento, pese a ser crucial, no supone inmediatamente profundas innovaciones filosóficas: en nuestra vida el tiempo siempre ha parecido una concomitante más vasta, más misteriosa, de mayor carga moral que el espacio. Existen muchos proverbios sobre el tiempo, unos cuantos sobre la distancia, ninguno sobre el espacio en general. Las hondas preocupaciones afectadas por la teoría galileana del movimiento son más bien relativas a la materia, la fuerza y la inercia. Sus opiniones sobre todos estos temas distaban mucho de ser límpidas y, aunque dejó numerosas sugerencias fecundas, sus sucesores tuvieron que clarificar y añadir muchas cosas.

Galileo no ideó ninguna teoría coherente de la materia en el sentido posterior del término, es decir, una teoría por medio de la cual las propiedades físicas y químicas macroscópicas de las cosas pudieran derivarse de una subestructura universal: la teoría atómica es un ejemplo. Sin embargo, en *El ensayador* (1623) Galileo declara que

16. Al decir «ideal» aquí, me refiero a esta sencilla serie de pasos: 1) exposición del objeto de la investigación; 2) los medios de efectuarlo; 3) los aparatos empleados; 4) los resultados obtenidos; 5) análisis en relación con el objeto.

tal teoría es necesaria porque, según él, los fenómenos de la sustancia no son ninguna guía de su realidad.[17] La distinción que hace entre cualidades primarias y secundarias tiene raíces griegas; Galileo la relaciona con una apreciación subjetiva y, oblicuamente, refuta así las cualidades aristotélicas. Cualidades como la dulzura, el sonido, el olor no tienen una existencia absoluta en el objeto dulce o perfumado, sino que existen únicamente en el sistema nervioso del sujeto: sin la guía de nuestros sentidos, la razón o la imaginación por sí solas probablemente nunca llegarían a cualidades como éstas. Así, la sensación de «cosquilleo» no está en absoluto en la pluma, sino en la piel sensible acariciada por ella. Los atributos «reales» de la materia, según Galileo, son la forma y el movimiento. «Creo que si se eliminaran las orejas, las lenguas y las narices, las formas, los números y los movimientos permanecerían, pero no así los olores, los sabores o los sonidos.» O, para el caso, el calor y el frío tal como los experimenta el cuerpo. Este argumento, ya procediera directamente de Galileo o de autores posteriores como Descartes, sería corriente en la revolución científica, fundamento conceptual de la filosofía mecanicista. Vició el realismo de Aristóteles, la suposición de que los atributos que encontramos en la naturaleza, como, por ejemplo, el color rojo de las rosas o el zumbido de las abejas, realmente están en la naturaleza en lugar de ser nombres que damos a sensaciones que se producen en nosotros. Las realidades, según la doctrina de Galileo o la de Boyle o la de Locke, son la forma de una molécula de sacarosa, las vibraciones del ala de un insecto o de una molécula de aire. Nos es tan imposible aprehender el pigmento de una flor diciendo que es amarilla como aprehender la naturaleza de una estrella diciendo que titila. El mundo de la experiencia sensorial directa es, casi universalmente, una textura engañosa, pues la realidad física es totalmente distinta y no puede describirse con el lenguaje de las sensaciones. En este sentido Galileo y la ciencia moderna, rechazando a Aristóteles, adoptaron la postura filosófica de los atomistas griegos.

¿Para qué sirve este argumento, aparte de para hacer que el observador se sienta humilde y escéptico ante sus propias sensaciones? Tal vez para nosotros la principal ventaja del rechazo de las cualidades consista en que la forma, el tamaño, el número y el movimiento

17. Stillman Drake, *Discoveries and opinions of Galileo*, Doubleday, Nueva York, 1957, pp. 274-278. Marie Boas (Hall) en *Osiris*, X (1952), pp. 435-437.

pueden medirse, lo cual es imposible en el caso de las sensaciones subjetivas; pero la antigua tradición destacaba más bien la simplicidad intelectual del materialismo: todas las sustancias y todas las sensaciones podían en principio reconstruirse partiendo de un reducido grupo de postulados, típicamente de la forma: la materia se compone de partículas que difieren en tamaño, forma y movimientos; y, además, cada propiedad es susceptible de ser modificada. Así, pues, los requisitos de una teoría de la materia que sirva para la reconstrucción de sensaciones de tipo directo (como la dulzura en la miel) y de fenómenos de la naturaleza (por ejemplo, los eclipses) son, en primer lugar, la especificación de la estructura (una serie de reglas relativas a las propiedades de los átomos, las partículas o lo que sea) y, en segundo lugar, la descripción de los procedimientos para llevar a cabo el proceso de reconstrucción partiendo de la especificación.

Galileo no acometió ninguna de estas tareas. No se declaró a favor de una subestructura de partículas invisibles, para la sustancia, ni dijo si las partículas son átomos o no. En las *Consideraciones* (1638), aunque habla con bastante claridad de átomos e indivisibles, parece confundir el asunto comentando las paradojas del infinito. Y, después de afirmar dogmáticamente que sólo eran reales las tres propiedades de la subestructura enumeradas por él, no dio ninguna regla para inferir del mundo microscópico el macroscópico. Como en el caso de Bacon, la mejor forma de expresar los puntos de vista de Galileo es hacerlo en relación con la teoría del calor, cuya causa es el movimiento: «Los materiales que producen calor en nosotros y nos hacen sentir lo cálido que se conocen por el nombre general de «fuego», serían entonces una multitud de partículas diminutas poseedoras de ciertas formas y moviéndose a ciertas velocidades». Las partículas diminutas y sus velocidades deben su existencia al proceso antecedente, tal como la combustión o la fricción acompañada de desgaste; además, Galileo sugiere que las partículas de fuego más diminutas se transforman en partículas de luz (obviamente, es esencial que exista algún vínculo de esta índole). Para explicar cómo la acción del calor hace que las sustancias se vuelvan fluidas, sustancias que se solidifican de nuevo al enfriarse, Galileo sugiere lo siguiente:[18]

18. Galileo Galilei, *Two new sciences* (en nota 12, arriba), p. 27, con leves alteraciones.

> Penetrando por minúsculos poros del metal, entre los cuales (debido a su estrechez) no podrían pasar las partículas más pequeñas de aire y otros fluidos, estas partículas de fuego podrían, llenando los huecos muy pequeños entre las partículas menores del metal, liberarlas de la fuerza por medio de la cual esos huecos empujan una partícula contra otra, de tal manera que no pueden separarse. Siendo así capaces de moverse libremente, toda su masa se transformaría en un líquido.

Observamos aquí dos conceptos que se introducen sin comentario y serán de mucha utilidad a posteriores filósofos mecanicistas: que las partículas tienen tamaños relativos y que las partículas que se mueven rompen partículas cohesivas más grandes. Sin embargo, la idea galileana de un «vacío activo» no duraría como explicación de la cohesión.[19]

Los escritos de Galileo no aclaran de qué manera, en general, se crea el movimiento de la materia. Galileo se limita a postular que las partículas de fuego, previamente inertes en un trozo de carbón vegetal encendido, de pronto se vuelven activas y móviles. (Tampoco, a mayor escala, explica Galileo la fuente del movimiento planetario.) Así, si rebautizamos con el nombre de *fuerza* en general la causa del movimiento de una partícula, Galileo no necesita considerar la relación de la materia y la fuerza ya sea macroscópica o microscópicamente, ni de abordar la cuestión de qué variedad de tales fuerzas puede haber. Al parecer, ni siquiera alude brevemente a la cuestión de si la materia es activa (con fuerzas internas, como suponían los alquimistas y los paracelsistas) o puramente pasiva, por lo que la «fuerza» debe tener una fuente de existencia independiente de la materia. Posiblemente esas cuestiones las habría considerado metafísicas, mientras que la existencia de partículas indivisibles parecía justificada por la razón. Lo único que nos dice es que no puede producirse ningún cambio de movimiento sin una causa (o fuerza) que lo efectúe,[20] y, por

19. La dureza de las partículas fundamentales parecía estar garantizada por su durabilidad; asimismo, la ductilidad implicaría estructura interna. Las variaciones de tamaño son hipotéticamente convenientes, pero no esenciales. Las variaciones de forma se abandonaron por considerarlas innecesarias y arbitrarias. El concepto de moléculas —racimos de partículas fundamentales de números y espaciados varios, dispuestas en pautas diversas—, que Galileo no menciona, daba gran flexibilidad. Por supuesto, no había mejor base que la «razón» para aceptar estas especulaciones en lugar de la teoría aristotélica, ni se disponía de ningún método de verificación.

20. «El movimiento en el plano horizontal es uniforme, ya que no hay ninguna

ende, el reposo o el movimiento uniforme sólo pueden concordar con la ausencia de causa: El grave como tal es indiferente: ni puede moverse más rápido ni más velozmente, ni encontrarse en ningún otro estado sin causa. Posee la cualidad que posteriormente Newton llamaría inercia.

Pero hay un problema. Galileo era consciente de él y no podía resolverlo. Si el grave es indiferente al movimiento, entonces todos los graves deberían comportarse de idéntica manera. Así ocurre en las aceleraciones naturales, porque (como descubrió Newton) la fuerza de gravitación es proporcional a la masa en todos los casos. Pero en los movimientos violentos la magnitud del cuerpo que se mueve es muy importante, aun cuando (como arguyó correctamente Galileo) un mínimo de fuerza dará cierta aceleración a un objeto, por grande que éste sea. Sin embargo, «quien cierre las puertas de bronce de San Giovanni tratará en vano de hacerlo de un único y sencillo empujón; pero con un impulso continuo imprime tal fuerza en ese pesado cuerpo móvil que cuando golpea la jamba hace temblar toda la iglesia».[21] El grave *no* es indiferente al movimiento ahora —por muy bien engrasadas que estén las bisagras, etcétera—, aunque no se le esté instando más desde el centro de la Tierra. La ligera puerta de un armario se mueve al menor impulso. Careciendo del concepto de masa, en este caso en que el concepto de peso no sirve Galileo no pudo aclarar esta cuestión.

La inercia es la primera propiedad mecánica de la materia. La palabra tiene muchos significados. En principio, para Aristóteles, como más adelante para Kepler, significaba «flojedad», la resistencia de la materia pesada a ser movida. Con Newton la inercia adquiere dos aspectos porque se convierte en resistencia a un cambio de movimiento; el grave se resiste igualmente a la aceleración y a la retardación y así, como «fuerza innata», hace que un cuerpo, una vez ha sido movido, se mueva de modo libre, uniforme (si no hay nada que lo impida). Galileo no parece emplear ningún nombre abstracto como «inercia». Prefiere que todo dependa del comportamiento del grave natural que se acelera hacia el centro de la Tierra y se desacelera al alejarse de él, si nada se lo impide. (En principio, el leve

causa de aceleración ni retardación», *Two new sciences*, p. 196, y en muchos otros lugares.

21. *Ibid.*, pp. 305-306.

natural haría lo contrario.) Por lo tanto, Galileo puede decir que allí donde el efecto es la aceleración natural, como todo efecto requiere una causa, la causa es el descenso (o, a la inversa, el ascenso). En tal caso, ¿cómo puede producirse el movimiento natural *uniforme*? ¿Cuál es su causa? Galileo contesta que sucede cuando el cuerpo pesado no asciende ni desciende, esto es, cuando se halla sobre un plano horizontal o lo que podría ser lo mismo: la superficie esférica perfectamente lisa de la Tierra misma, *siempre y cuando el cuerpo ya se esté moviendo*, pues entonces se encuentra en un estado de indiferencia:

> Si el plano no fuera inclinado, sino horizontal, entonces esta esfera sólida colocada sobre él haría lo que quisiéramos: es decir, si la dejamos en reposo, permanecerá en reposo, y si se le da un *impetus* en cualquier dirección, se moverá en esa dirección, manteniendo siempre la misma velocidad que recibió de nuestra mano y sin tener propensión a incrementar o disminuir esta velocidad, no habiendo ni ascenso ni descenso a lo largo del plano.[22]

De nuevo se abstiene Galileo de señalar que, si bien el dedo pulgar podría impulsar una canica, haría falta un empujón verdaderamente fuerte para imprimir la misma velocidad a una bala de cañón: la materia *no* se comporta indiferentemente «como nosotros queramos»; pero, lo que es más importante, este movimiento uniforme, que continúa indefinidamente, ¿no es él mismo un efecto? Y, si lo es, ¿cuál es la causa? Volvemos a encontrarnos frente al viejo problema de la mecánica del *impetus* y, de hecho, Galileo dice que el cuerpo «tiene *impetus*» (en otras partes utiliza de manera análoga la palabra «*momentum*»). Sin embargo, Galileo tiene razón en su comentario, aunque su lenguaje no esté libre de ambigüedades (como no lo estaba el de Newton): no hay ninguna causa de movimiento uniforme bajo estas condiciones ideales.

Dado que el reposo y el movimiento uniforme son equivalentes, podemos decir que los cuerpos que comparten el mismo movimiento uniforme están mutuamente en reposo. También esto lo comentará Galileo extensamente, como veremos.

En la física aristotélica, que racionalizaba la experiencia cotidiana,

22. *Ibid.*, p. 297.

el reposo era normal y el movimiento era un estado que requería una explicación especial; en la física de Galileo, donde el espacio ha sido idealizado hasta convertirlo en un mundo vacío, geométrico, tan duro y cristalino como las esferas de Aristóteles, sólo los cambios de estado requieren explicación. Así, pues, el concepto de *impetus* o «potencia impresa» como causa del movimiento continuo pasó a ser superfluo o, de hecho, erróneo. Su abandono ya lo anunciaba un tratado anterior, *De motu*, en el que Galileo hablaba de la neutralidad en movimiento de una esfera colocada sobre un plano horizontal, donde el movimiento no es natural ni forzado y «puede moverse mediante la menor de todas las fuerzas posibles».[23] Aquí, sin embargo, no preveía aún la uniformidad del movimiento continuo. Tampoco había tardado en convencerse de que el movimiento, incluso cuando no había la menor resistencia, no podía ser infinitamente veloz. En el pensamiento de Galileo, una vez modificado, un cuerpo en movimiento no podía contener más «potencia impresa» que un cuerpo que no fuera movido; más bien debía suponerse que el movimiento generaba lo que Galileo fue el primero en denominar *momentum*. Mientras que el *Diálogo sobre los sistemas máximos* e incluso las *Consideraciones* contenían aún mucho lenguaje medieval, a partir de 1608 Galileo abandonó por completo los conceptos medievales de movimiento, a expensas (como vio Koyré hace mucho tiempo)[24] de la pretensión de los peripatéticos de describir el mundo real de la experiencia. Porque el mundo real conoce la fricción, la resistencia del aire y otras complicaciones de la teoría ideal del movimiento, de aquí que la teoría ideal no pueda verificarse perfectamente mediante experimentos realizados en condiciones que no sean ideales. Esto lo entendía claramente Galileo, que explicó cómo la estructura y la relación ideales de las cosas pueden percibirse y verificarse bajo la pauta de pequeñas discrepancias nacidas de la mayor complejidad de nuestros experimentos; cuando en el *Diálogo* se le expuso la opinión de que «estas sutilezas matemáticas están muy bien en abstracto, pero no dan resultado cuando se aplican a cuestiones sensatas y prácticas», contestó que, si primero uno recordaba

23. «De motu», cap. 14. I. E. Drabkin y S. Drake, *Galileo on motion and mechanics*, Wisconsin University Press, Madison, 1960, pp. 65-66.
24. Alexandre Koyré, *Études galiléennes*, Hermann, París, 1939, p. 71; hay trad. cast.: *Estudios galileanos*, Siglo XXI, Madrid, 1980.

que las esferas y planos reales carecían de la perfección de las formas geométricas, entonces

> lo que sucede en lo concreto hasta este punto sucede de la misma manera en lo abstracto. Sería en verdad una novedad que los cómputos y proporciones hechos en números abstractos no se correspondieran después con moneda de oro y plata y mercancías concretas ... el científico matemático, cuando quiere reconocer en lo concreto los efectos que ha demostrado en lo abstracto, debe deducir los obstáculos materiales y si puede hacerlo así, yo os aseguro que las cosas no concuerdan menos que los cómputos aritméticos.[25]

Tan atrás ha dejado Galileo la búsqueda de un algoritmo que meramente permita calcular el movimiento acelerado natural, tan atrás ha dejado el antiguo deseo de «salvar los fenómenos», que ahora empieza a formular una teoría coherente de la física matemática como algo capaz de construir descripciones aún más sutiles de la realidad, cada vez más cerca de la experiencia. Las matemáticas no podían proporcionar modelos meramente arbitrarios capaces de fabricar predicciones y versiones «idealizadas» de un universo geométrico, sino, en principio, una descripción analizada del mundo tal como los experimentos demuestran que es.

Una vez el concepto impreciso y causal de *impetus* fue suplantado por los conceptos complementarios de la inercia y el *momentum*, por incompletos e imperfectos que éstos fuesen aún, fue posible ampliar en gran medida las potencialidades del método geométrico en la cinemática. Añadiéndole una definición de la aceleración natural y la ley de la caída, la estructura básica quedó completada, de aquí que Newton (¡por una vez con demasiada generosidad!) reconociera que Galileo era el descubridor de las dos primeras leyes del movimiento. Lo que Galileo dejó de hacer, de hecho, fueron la definición exacta del movimiento inercial y el concepto generalizado de la fuerza. Ambos defectos se debieron en parte a que Galileo no pudo dar una homogeneidad y una consistencia completas a su concepto del movimiento.

En el *Diálogo sobre los máximos sistemas* Galileo hace dos alusiones a una clasificación del movimiento cuyo origen está en Copérnico:

25. Galileo, *Dialogue concerning the two chief world systems*, trad. de Stillman Drake, University of California Press, Berkeley, 1953, pp. 203-208.

> ... si todos los cuerpos íntegros que hay en el mundo son por naturaleza móviles, es imposible que sus movimientos sean rectos o de cualquier otra forma salvo circulares; y la razón es muy sencilla y obvia. Porque cualquier cosa que se mueve en línea recta cambia de lugar y, continuando su movimiento, se aleja aún más de su punto de partida y de todos los lugares que atraviesa sucesivamente. Si ese fuera el movimiento que realmente le conviniera, entonces es que al principo no estaba en su lugar apropiado. Así, pues, las partes del mundo no estaban dispuestas en perfecto orden. Pero estamos dando por sentado que se hallaban perfectamente en orden, y en tal caso es imposible que sea propio de ellas cambiar de lugar y, por consiguiente, moverse en línea recta.

Y, así, parece ser que el movimiento rectilíneo «es asignado por la naturaleza a sus cuerpos (y sus partes) cuando quiera que éstos se encuentren fuera de sus lugares apropiados, mal dispuestos y, por lo tanto, necesitando que se les devuelva a su estado natural por el camino más corto».[26] Obviamente, se trata de una versión corregida y aumentada de la dicotomía aristotélica entre movimientos celestes y terrestres, sin excluir la revolución circular de la Tierra ni (como había apuntado Copérnico) la caída vertical de piedras marcianas sobre Marte. Galileo no parece hablar sin haber meditado sus palabras, que concuerdan con la total ausencia en sus escritos de sugerencias en el sentido de que fuese posible concebir que el movimiento rectilíneo o el acelerado pertenece a los cuerpos celestes. De hecho, parece que Galileo creía que su movimiento circular no requería ninguna explicación. Por otro lado, cuando habla de movimiento rectilíneo continuo se refiere siempre a un acontecimiento terrestre, en una situación «arquimediana» (en la que se interpreta que la superficie de la Tierra es un plano y que todas las líneas trazadas hacia su centro son perpendiculares al plano). En esta situación el movimiento inercial debe ser rectilíneo. Por extensión, Galileo parece creer que una bola que rodase en torno a la esfera de la Tierra, que es perfectamente redonda, sin acercarse a su centro ni alejarse de él, conservaría su velocidad uniforme para siempre: donde el plano infinito se dobla formando un círculo no hay diferencia entre ellos. Galileo no tiene inconveniente en argüir que el mínimo de fuerza basta para hacer que un objeto suelto se mantenga pegado a la Tierra, precisa-

26. *Ibid.*, pp. 19, 32.

mente porque en su origen el ángulo de contacto entre la esfera y el plano es infinitamente pequeño. Sin embargo, sabía que la piedra se escapa de la cuerda siguiendo una línea recta y asoció correctamente este hecho con la relación inversa entre este esfuerzo y el tamaño del círculo de revolución.[27]

La restricción universal del movimiento inercial a una línea recta la efectuó Descartes (1644), quien comprendió que un movimiento que no fuera perturbado tenía que ser recto y que, por ende, una curva de cualquier clase significa que sobre el movimiento actúa alguna influencia (fuerza). Una vez más resulta obvio que el enfoque dinámico clarifica la cinemática de Galileo. Es curioso que Galileo, habiéndose percatado de la insensatez de las distinciones cualitativas entre movimientos «naturales» y «violentos», conservase parte del privilegio aristotélico de los primeros, en donde (como hemos visto) no se plantea el problema de la relación entre fuerza aplicada, peso (o, en sentido riguroso, masa) y aceleración. La dificultad de Galileo aquí era geométrica, así como conceptual. Sostenía el estricto principio griego de que sólo pueden establecerse proporciones entre cantidades similares; del mismo modo que no puede haber proporción entre la naturaleza gredosa y la naturaleza caseosa, tampoco, a su juicio podía la velocidad ser una proporción entre tiempo y distancia. En sus representaciones geométricas el eje temporal (vertical) es AB y sus ordenadas representan velocidades instantáneas; la distancia de caída la representa la línea HI. La aceleración constante se mide implícitamente por el ángulo BAC (Galileo no lo dice) mientras que la fuerza no está representada en absoluto. Galileo nunca representó la distancia mediante la superficie ($v \times t$) o, todavía menos, como suma utilizando velocidades instantáneas. No muestra ninguna inclinación por las matemáticas de los indivisibles y no presta la menor atención al álgebra. Así, pues, la relación, sencilla para nosotros, entre los efectos de un peso estático (mg) y un peso que cae (al caer adquiere una energía mgh) se le escapó por completo. Pero, aparte de esta dificultad de procedimiento, Galileo —después de escribir *De motu* en donde la aceleración se vincula a la resistencia del medio— mostró repugnancia filosófica a dar entrada a la fuerza en el esquema natural de las cosas. El ejemplo supremo y más violento de fuerza era el de la pólvora y las velocidades inmensas producidas por ella;

27. *Ibid.*, pp. 216-217.

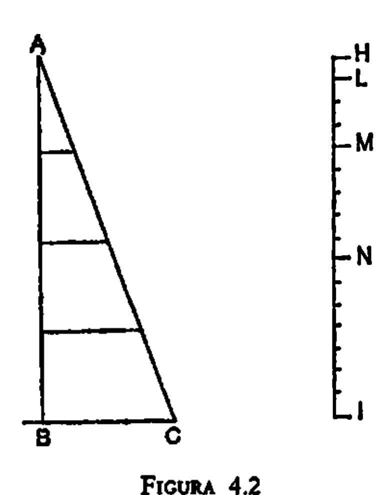


FIGURA 4.2

Aceleración y distancia

estos efectos «sobrenaturales» los excluyó específicamente más de una vez. No veía la fuerza como parte del orden natural, que constituía su principal preocupación, e incluir la fuerza en este esquema geométrico de tiempo, velocidad y distancia habría sido como añadir una cuarta dimensión.

El atrevimiento del título de las *Consideraciones* está ampliamente justificado. En efecto, Galileo demostró por vez primera de qué modo la resistencia de las vigas y la estructura hecha con ellas podía relacionarse geométricamente con sus formas y tamaños; también aportó una ciencia cuantitativa de los movimientos de gravitación de los graves, incluyendo los proyectiles. Había resuelto el problema de la trayectoria e inventado el péndulo cronometrador. Pero nunca había sido su objetivo (o no lo fue después de *De motu*) aportar una filosofía completa del movimiento, o siquiera (en el citado libro) integrar su nueva ciencia completamente en la filosofía natural. No oculta que quedan muchas dificultades para cuya solución había al menos brindado sugerencias: la fuerza de rotación, la verdadera trayectoria descendente de los cuerpos que caen, el isocronismo del péndulo y la fuerza de percusión, por ejemplo. Y, aunque había concedido tanta importancia a los movimientos microscópicos, no había dado el menor

indicio de qué debía hacerse para que la ciencia matemática del movimiento penetrase hasta las raíces de la física. Lo que resultó interesante, en el contexto más amplio que, por lo demás, Galileo olvidó casi del todo, fue la relación de la teoría del movimiento con la disputa copernicana, que estudiaremos en el próximo capítulo.

Antes de pasar a ello, deberíamos añadir algo relativo al método galileano en la ciencia física. Cabría preguntarse qué pretendía descubrir Galileo y cómo, a su juicio, debía buscarse este desiderátum. Al tratar de responer a estas preguntas, hay que tener presente que el propio Galileo y los objetos de sus exploraciones intelectuales cambiaron mucho a lo largo de los años. La mayor influencia en sus primeras notas o *Juvenilia* fue la de los padres jesuitas del Collegio Romano, de los cuales sólo uno, Cristoforo Clavius era matemático;[28] años después atacaría con fuerza esta tradición aristotélica en que le habían educado e incluso denigraría a toda la escuela de «filósofos», aunque reclamaba este título para sí y nunca pudo renunciar del todo a su educación. Crombie pone de relieve el legado que Galileo, con su habitual meticulosidad, estudió en la juventud cuando habla de «la longevidad y la profundidad del conocimiento aristotélico desde el cual Galileo abordó la búsqueda de la verdadera cosmología que se convirtió en la preocupación intelectual predominante de su vida (madura)», mientras que Drake hace hincapié en la reacción de Galileo contra el conservadurismo filosófico y anticopernicano cuando declara que «la oposición de Galileo a los filósofos en las cuestiones científicas ya existía varios años antes del telescopio».[29] Además, Galileo empezó en la tradición de los argumentos escolásticos tardíos (en *De motu*), pasó luego al razonamiento proposicional «arquimediano», exploró después los recursos de la experimentación y hasta sus últimos años no hizo suyo el problema copernicano. Sería necio buscar una constancia total, sin ningún cambio, en la actitud galileana ante el conocimiento natural durante su vida. A diferencia de la mayoría de los hombres, parece que fue haciéndose más radical y más escéptico al envejecer.

A diferencia de Descartes entre sus casi contemporáneos, Galileo no escribió un tratado completo explicando la base metafísica y lógica

28. A. C. Crombie, en J. Hintikka, D. Gruender y E. Agazzi, eds., *Pisa Conference Proceeding*, I, Reidel, 1980, p. 279.

29. Stillman Drake, *Galileo against the philosopher*, Zeitlin & Ver Brugge, Los Angeles, 1976, p. XII.

de la filosofía natural y tampoco, a diferencia de Gassendi, adoptó ante la naturaleza una visión no aristotélica, tomada de la antigüedad. Las opiniones de Galileo hay que sacarlas por partes de numerosos escritos, los más obvios de los cuales son tal vez el *Saggiatore* («El ensayador») (1623) y el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas* (1632), obras éstas, sin embargo, que Galileo, al igual que otros, escribió con fines polémicos y no epistemológicos. Galileo no era sistematista, no ofrecía una sola clave conceptual de los misterios de la naturaleza, una clave como la posterior filosofía mecanicista. Si, como hemos dicho, hay que contarle entre los primeros mecanicistas, el hecho es casi accesorio al estudiar sus logros. Tenemos una idea razonablemente clara del significado de «ciencia newtoniana» o de «ciencia cartesiana», pero puede haber dudas sobre lo que significaría «ciencia galileana», o sobre cómo podría hacerse extensiva a una visión universal de la naturaleza; sin embargo, uno tiene ciertamente la impresión de que Galileo fue mucho más que el fundador de la cinemática y de la astronomía telescópica. A veces se ha argüido que el hecho mismo de que no haya una ciencia galileana sistemática prueba la modernidad de Galileo, pero mi opinión personal es que, como ocurre con Aristóteles, Galeno o Descartes, los sistematizadores como Newton, Darwin y Einstein han continuado desempeñando un papel esencial en la evolución de la ciencia.

Lo más importante es la insistencia de Galileo en estudiar lo que es, y lo que es conocible, el realismo comentado anteriormente (p. 161). En este sentido, Galileo compartía muy poco la creencia platónica de que la experiencia da sólo una idea indefinida de las verdaderas relaciones que gobiernan el universo. He aquí el motivo de la antipatía de Galileo hacia los escritos de Kepler, pues Kepler estaba convencido de que la comprensión profunda requería una aprehensión de los Arquetipos de la naturaleza. Sobre todo en sus escritos posteriores, vehementemente antiescolásticos, Galileo parece argüir a veces que la única prueba válida de una proposición tiene que ser experimental y, por consiguiente, hay que desechar por disparatadas las formas y cualidades de los filósofos, los Arquetipos, la influencia de la Luna en el mar y todas las cosas que no puedan observarse directamente.

En *El ensayador* Galileo ridiculizaba semejantes recursos a lo inobservable y su retórica resulta aún más notable si se tiene presente que la intención de su argumento —demostrar que los meteoros

no podían calentarse hasta la incandescencia a causa de la fricción en la atmósfera de la Tierra— es incorrecta:

> Si Sarsi quiere hacerme creer que los babilonios cocían los huevos arrojándolos con una honda [escribió], así lo creeré, pero debo decir que la causa de este efecto era muy distinta de la que él sugiere [es decir, la fricción]. Para descubrir la causa verdadera, razono del modo siguiente: «Si no conseguimos un efecto que otros conseguían antes, debe ser que en nuestras operaciones falta algo que produjo el éxito de las suyas ... No nos faltan huevos, hondas ni tipos vigorosos que las hagan girar, sin embargo, nuestros huevos no se cuecen, sino que se enfrían más aprisa si da la casualidad de que están calientes. Y, como a nosotros no nos falta nada salvo ser babilonios, entonces las causa de que se endurecieran los huevos era ser babilonios y no la fricción en el aire».[30]

Según Galileo, la filosofía natural no es una cuestión de argumentos verbales, como el discurso de un orador o el alegato de un defensor; no es cuestión de repetir lo que otros han declarado, ni de repetir lo que los antiguos podían hacer, ni de soñar con maravillas ya perdidas. Los hombres son como eran, la naturaleza es como era y sus secretos son tan asequibles y demostrables para nosotros, ahora, como en cualquier época. Las maravillas naturales que aparecen en los libros suelen basarse en errores de hecho, mientras que las verdaderas maravillas de la naturaleza (como las que él enumera de vez en cuando: por ejemplo, que una aguja flote en el agua) pueden verse con los ojos.

Sin embargo, Galileo no es un realista ingenuo. No afirma que todo deba ser visible o tangible. Basa sus argumentos en las partes y los vacíos más pequeños de la materia, por ejemplo, los cuales no son más directamente demostrables que las formas. Está dispuesto a idealizar la naturaleza, como si la superficie de la Tierra fuese un plano. Sobre todo, rechaza las objeciones ingenuas-realistas contra el movimiento de la Tierra; aquí la experiencia cruda, como él insiste una y otra vez, es engañosa y debemos aprender a interpretar nuestra experiencia de la solidez inmóvil de la Tierra para descubrir qué es lo que verdaderamente ocurre (Galileo muestra aquí su faceta más

30. Idem. *Discoveries and opinions of Galileo*, Doubleday, Nueva York, 1957, p. 272.

platónica). De hecho, es obvio que Galileo se da cuenta —al menos en astronomía— de que todos nuestros juicios en el conocimiento están cargados de teoría: de no ser así, creeríamos que el Sol, la Tierra y la Luna son del mismo tamaño, y es obvio que lo mismo ocurre en la ciencia pura de la mecánica, toda vez que carecemos de experiencia de cuerpos perfectos o de espacios absolutamente vacíos. La experiencia, pues, no debe aceptarse ingenuamente como terminante, sino que es preciso examinarla críticamente para que las anomalías aparentes (como el hecho de que una aguja de acero flote en el agua) puedan resolverse mediante una mejor comprensión, por ejemplo, en términos de una teoría más compleja que la de que «sólo los cuerpos menos densos que el agua flotan en ella». Como dice Crombie: «La ciencia experimental racional de Galileo se definía por su búsqueda integrada y simultánea tanto de resultados prácticos reproducibles como de los correspondientes principios de explicación teórica».[31] La explicación, sin embargo, consistía en aludir a un procedimiento de justificación más que a un sistema de ideas a la manera de Aristóteles o Descartes.

Es seguro, por lo tanto, que el alcance y el carácter de la ciencia física de Galileo tienen que ser más restringidos que los de Aristóteles, Descartes o Newton, pues carecen de un sistema que proporcione términos universales de explicación, de leyes de la naturaleza y de modelos teóricos susceptibles de una nueva aplicación. Sus explicaciones de los fenómenos —de la flotación, de la cohesión de la materia, del fuego, de la reflexión de la luz, de la óptica de los telescopios, de la armonía en los sonidos— parecen inconexas y fortuitas, mientras que en lo referente a algunos de los tradicionales temas profundos de la filosofía natural (la luz, la gravedad, el movimiento planetario) Galileo calla o resulta enigmático. La síntesis en gran escala no le atraía. En cambio, su obra está unida como filosofía *matemática.* Galileo recalca repetidamente la superioridad de los argumentos matemáticos (cuantitativos) sobre los retóricos (cualitativos). ¿Por qué tratar de probar con palabras lo que puede demostrarse geométricamente? En 1605 Galileo publicó anónimamente todo un diálogo burlesco, en dialecto paduano, para demostrar esta opinión contra los filósofos que atacaban el «criterio expresado [por el propio Galileo] de que no es juicioso abandonar los sentidos e ir en busca

31. Crombie, *loc. cit.* (en nota 28).

de la razón [o la causa]». Según el punto de vista tradicional, las matemáticas no tenían nada que ver con la verdad; Galileo creía lo contrario y, por ende, que la aplicación de las matemáticas a los fenómenos (tal como se revelan a los sentidos) produciría la verdad.[32] Como Platón y Kepler, no veía la morfología esotérica de la naturaleza reflejada en formas geométricas y creía aún menos que las matemáticas proporcionasen una clave simbólica de la naturaleza; más bien estaba convencido de que, como las pautas de la naturaleza son necesariamente geométricas, el modo más fácil y correcto de comprenderla es recurrir al razonamiento geométrico. Donde más obviamente cierto es esto —a los ojos de matemáticos como Euclides, Galileo, Kepler y Newton— es en el caso del espacio: el espacio tridimensional en el que vivimos y respiramos debe corresponder necesariamente (cuando esté idealmente libre de las imperfecciones de reglas y teodolitos) con el espacio euclidiano; lo mismo cabe decir de cualquier fenómeno físico que describa una curva: si al igual que un punto en una rueda, un planeta o el proyectil de Galileo, describe una curva definible, entonces los razonamientos válidos para la curva geométrica son válidos para la trayectoria física; y Kepler (no Galileo) hubiera hecho extensiva la misma idea a la forma de los cristales: los ángulos y planos de los cristales deben corresponder a la geometría del espacio.

No todo esto era nuevo. Ningún filósofo había argüido que la óptica geométrica daba falsos resultados: habría argüido (correctamente) que hay preguntas sobre la visión, la luz y el color que la óptica geométrica no puede contestar y habría considerado (incorrectamente) que estas preguntas estaban reservadas para la filosofía. Lo que era fundamentalmente original y revolucionario en el concepto de Galileo (y cabría añadir que también en los de Kepler y Descartes) era la seguridad de que, en principio, las potencialidades del razonamiento matemático iban mucho más allá de los estrechos límites autorizados por la filosofía tradicional; de manera que (en la extensión definitiva que lleva aparejado un cambio de definición) no había ninguna proposición perteneciente al conocimiento natural que no debiera argüirse *more geometrico* —a la manera matemática—, aunque para filósofos como Descartes y Spinoza (pero no Newton) esto no significaba por fuerza argüir en términos de magnitudes. Y, obvia-

32. Drake, *op. cit.* (en nota 29).

mente, si debiera excluirse por definición el razonamiento no matemático del conocimiento natural, entonces se excluye la filosofía verbal. No insinúo ni por un momento que Galileo o Descartes adoptasen un criterio tan extremo, pero al principio Galileo apuntó la tendencia en esa dirección. Allí donde sea posible el filósofo natural debe ocuparse de números y medidas: en la medida en que el reino del razonamiento cuantitativo y matemático pudiera incrementarse, más segura se haría la filosofía natural.

Este fue el mensaje que Galileo transmitió a sus sucesores y que ellos entendieron, viéndole (como a él le habría gustado que le vieran) como un nuevo Arquímedes: Borelli, Castelli, Huygens, Wallis y Newton, matemáticos todos ellos, eran los expositores naturales de la ciencia de Galileo. Descartes, el gran sistematizador, y que tal vez rivalizaba demasiado con él para juzgar sus méritos con toda imparcialidad, opinaba que la forma en que Galileo trataba el movimiento era demasiado poco filosófica, demasiado oportunista, porque carecía de una consideración profunda de la naturaleza y la función del movimiento en el universo; sin embargo, él mismo dejó sin resolver los problemas de la cinemática (habiendo caído en una etapa primeriza, como ha demostrado Koyré, en las mismas trampas que Galileo).[33] A decir verdad, habiendo fundamentado su sistema del mundo en la partición del movimiento entre sus partículas componentes, fue totalmente incapaz de ofrecer una explicación matemática del movimiento, microscópico o macroscópico. Sin embargo, los seguidores del modelo de Galileo no sólo perfeccionaron la axiomatización de la mecánica, sino que también demostraron cómo, macroscópicamente, el mismo tratamiento podía hacerse extensivo a los problemas que el propio Galileo no pudo resolver (por ejemplo, el movimiento pendular y la colisión de los cuerpos); además, especialmente en los *Principia* de Newton, se prueba que la cinemática galileana es válida para todos los cuerpos, incluyendo las partículas más pequeñas de la materia. Aquí se encuentran por fin Galileo y Descartes, aportando el primero la teoría matemática, de la que había carecido por completo la filosofía mecanicista hasta la época de Huygens y Newton.

33. Alexandre Koyré, *Études galiléenes*, Hermann, París, 1939, 1966, segunda parte.

Capítulo 5

LA REVOLUCIÓN ASTRONÓMICA

El período de relativo silencio durante el cual se hicieron pocos comentarios, ya fuesen favorables o desfavorables, sobre el nuevo sistema celeste propuesto por Copérnico duró más de una generación después de publicarse *De revolutionibus*. Aunque el libro fue publicado en Nuremberg, Rheticus, el único discípulo de Copérnico, era de Wittenberg y los primeros lectores fueron guiados por la interpretación ficcionalista emanante de aquel centro de ortodoxia luterana: debía interpretarse que Copérnico proponía un sistema matemático y no un sistema físico. Ningún lector normal necesitaba preocuparse por la inestabilidad de una Tierra que daba vueltas. Por ejemplo, en 1584 Rembert Dodoens —célebre como botánico— publicó en Amberes un librito de texto, *Sobre la esfera*, en el que nombraba a Copérnico cinco veces y alababa sus estimaciones del tamaño de la Luna, la Tierra y el Sol sin hacer ninguna alusión a que Copérnico, al igual que Dodoens, no creía que la Tierra estaba fija en el centro del universo.[1] Algunos destacados astrónomos profesionales, como Johannes Praetorius (1537-1616) de Wittenberg y el gran Tycho Brahe, racionalizaron su postura reinvirtiendo la geometría copernicana de tal manera que la Tierra volvió a ser el centro del sistema.[2] Con una o dos excepciones como la del inglés Thomas Digges (p. 182), que no era astrónomo profesional y no ejerció influencia alguna, hasta el último decenio del siglo XVI no comenzaron a

1. No he visto la primera edición (1548) de este libro. Es obvio que Dodoens conocía *De revolutionibus* de manera muy superficial.
2. Robert S., Westman, en R. S. Westman, ed., *The Copernican achievement*, University of California Press, 1975, pp. 285-345.

aparecer los verdaderos copernicanos y con ellos la posibilidad de un conflicto entre la astronomía realista por un lado y la filosofía y la religión por el otro.

Desde este momento hasta finales del siglo XVII hubo una disputa ruidosa y no siempre elevada entre los partidarios de las nuevas opiniones y los de las antiguas, una disputa en la que la astronomía hizo de piedra de toque. Su calor produjo el comentario simpático (pero vano) de John Wilkins en 1638: «Es una Regla excelente que debe observarse en todas las Disputas, que los Hombres den *Palabras suaves* y *Argumentos duros*; que no se esfuercen tanto por *vejar* como por convencer al *Enemigo*». El triunfo de los innovadores no fue rápido: la obra maestra de Copérnico adornaría el *Índice de Libros Prohibidos* (tal vez la mejor bibliografía de originalidad literaria y filosófica jamás recopilada) hasta 1822. En Toscana y Nápoles el copernicanismo fue condenado con vehemencia hasta principios del siglo XVIII, mientras que en muchos lugares la Tierra aparecía en libros, en modelos, en relojes, en su posición tradicional, o ésta se expresaba como una de dos alternativas posibles. De hecho, ningún fenómeno o principio conocido requería que la Tierra estuviese en movimiento hasta que en 1687 Newton demostró cómo la Tierra y el Sol deben girar alrededor de su centro de masa común que, debido a la enorme disparidad entre los dos cuerpos, debe estar cerca del centro del Sol.[3] Este fue el primer argumento positivo en uno u otro sentido. Hay que juzgar que la innovación copernicana promovió inmensamente el desarrollo de la ciencia de la mecánica, pero en el estudio que de ella hizo Galileo no había nada que justificase su copernicanismo (aunque, de hecho, él pensaba lo contrario). En especial, nada podía hacerse por ella con los argumentos matemáticos que Galileo valoraba tanto; sin embargo, la persistencia de los copernicanos en aducir que su opinión indemostrable era más plausible que el punto de vista rival, es decir, el geocéntrico, produciría cambios de enorme valor.

El primer conflicto entre los innovadores del pensamiento y el saber autoritario, conflicto que influiría mucho en la actitud que la iglesia católica adoptaría ante la cuestión copernicana y también (en parte) en el espíritu del movimiento científico, que se mostraba a la vez defensivo ante las alegaciones de irreligión y hostil a la forma

3. *Principia*, libro III, proposición 12.

más antigua, literaria, de erudición, no tenía estrictamente nada que ver con la ciencia natural, aunque estaba inspirado en parte por la revolución copernicana: al defender el copernicanismo en Oxford en 1584, Giordano Bruno (1548-1600) arguyó que el propio Copérnico, que era un simple matemático, no había apreciado la verdadera naturaleza de su redescubrimiento del antiguo sistema centrado en el Sol. Los eruditos modernos consideran a Bruno, que renunció a su ordenación religiosa, sobre todo como un mago hermético; en el curso de inquietos viajes que le llevaron de Italia a Francia, Londres, Wittenberg y, fatalmente, Venecia, defendió con franqueza y temeridad extraordinarias un concepto de religión «egipcia» modificada y más antigua que el cristianismo, aliada a la filosofía neoplatónica, cuyos orígenes, según él, se remontaban a la misma fuente. Bruno se convirtió en el hombre más peligroso de Europa, a quien ni siquiera el emperador Rodolfo II quería tener mucho tiempo a su lado, y muchísima gente le tenía por adorador del diablo. Su reputación bastó para que lo detuvieran en Venecia y, después de años de juicios y encarcelamiento, lo condenasen a la hoguera, en Roma, el 17 de febrero de 1600. En comparación con sus otros delitos contra la religión, es probable que el hecho de que vinculara a Copérnico con la animación total de la naturaleza y la adoración del Sol o de que poblase una infinitud del espacio con innumerables mundos fueran crímenes bastante insignificantes. (Los documentos judiciales fueron destruidos por Napoleón.)

Especulaciones como éstas, que se encuentran en *De l'infinito, universo e mondi* (1584),[4] de Bruno, y que, naturalmente, fascinaron a algunos pensadores, ya habían aparecido muy al principio de la historia del pensamiento —pues, ¿por qué iban los hombres a ser tan mezquinos como para suponer que su mundo y la vida que hay en él serían únicos en la inmensidad de las cosas?— y habían sido objeto de fuertes ataques por parte de Aristóteles. Los cristianos siempre las habían considerado peligrosas desde el punto de vista teológico. Sin embargo, en su *Livre du ciel et du monde* (*c.* 1370) Nicolás Oresme había prestado mucha atención al asunto. Consideró la posibilidad de que en el tiempo o el espacio hubiera una pluralidad de mundos de tal manera que hubiese un mundo encerrado en

4. Traducción inglesa en D. W. Singer, *Giordano Bruno, his life and thought*, Schuman, Nueva York, 1950.

otro o mundos separados esparcidos por el espacio, por ejemplo, más allá de «nuestro» universo, todo ello obra de un solo Creador. El argumento aristotélico de que el material-tierra de otro mundo se vería atraído hacia un lugar natural en el centro del nuestro lo refutó Oresme replicando que el lugar natural para dicha tierra sería el centro de su propio mundo. Que se restringiera el poder creativo divino a la fabricación de un universo único lo consideró como una negación de la omnipotencia. Además, Oresme tuvo la osadía de declarar que es natural que los hombres crean que hay espacio más allá de las estrellas fijas que limitan «nuestro» universo: en este espacio Dios podía hacer que existiesen otros mundos. Oresme sacó la conclusión de que la razón por sí sola no podía eliminar la posibilidad de una pluralidad de mundos, pero, de hecho, nunca había habido más de uno y probabemente nunca lo habría.[5] Como cabría esperar, parece que el propósito de Oresme es demostrar la superioridad de la fe y de la revelación sobre la razón falible. En Bruno, o en los autores de fantasías científicas del siglo XVII, tales como *Discovery of a world in the moon* (1638), de John Wilkins, el talante es distinto y ya no se advierte la total prohibición de pensar en la posibilidad de que existan otros mundos y otros hombres.

La creencia afín en la infinitud y la eternidad de todo el cosmos también era antigua. Estas doctrinas las expuso Lucrecio, que las recibió de Demócrito, y fueron desarrolladas por un importante grupo de filósofos musulmanes y hebreos de la Edad Media, aunque gozaron de escaso favor entre los cristianos. Oresme parece hacer alusión a la infinitud del espacio. Más cerca de la época del propio Bruno, la imposibilidad de concebir que el espacio tuviera límites la afirmó Nicolás de Cusa en el siglo XV y fue de él de quien Bruno recibió su inspiración. En sus propios tiempos la idea fue relacionada específicamente con la hipótesis copernicana por el matemático inglés Thomas Digges. Éste creía que las estrellas fijas se hallan a una distancia infinitamente remota de la Tierra, idea que pudo adoptar porque ya no era necesario suponer que estaban fijas en una esfera giratoria. Pese a ello, Digges seguía situando la morada de Dios y de los elegidos más allá de las estrellas en el más remoto reino del espacio. La hipótesis copernicana sólo exigía que la distancia hasta la estrella fija más cercana fuera en verdad muy grande comparada con

5. *Medieval Studies*, II, pp. 233, 242, 244.

la distancia entre la Tierra y el Sol; de haber sido esta proporción mucho más pequeña de lo que es en realidad, el astrónomo del siglo XVI hubiera seguido, en sus observaciones celestes, sin detectar ninguna prueba del movimiento de la Tierra. En cuanto a la infinitud del espacio fuera de «nuestro» universo, era perfectamente compatible con la astronomía ptolemaica y no era en absoluto una innovación copernicana. Por grande que sea el interés intrínseco de las ideas de Bruno, la idea de la pluralidad de mundos no la inspiró el Renacimiento científico, no fue una deducción lógica sacada de la astronomía heliocéntrica y no tuvo absolutamente nada que ver con el progreso de la ciencia.

Es conveniente tratar de definir la apreciación contemporánea de una situación como ésta. Los filósofos medievales y de principios del período moderno veían claramente que no es lo mismo introducir consideraciones religiosas en una especulación cuasi científica que introducirlas en la interpretación de observaciones o experimentos. Hasta mediados del siglo XVII muchísimos científicos eran hombres de convicciones religiosas extraordinariamente profundas, y ninguno de ellos utilizaba la ciencia como arma contra la religión. Thomas Hobbes no obtuvo la aprobación de la Royal Society. El fomento de la ciencia y de la religión solían considerarse como objetivos inseparables. En especial los científicos ingleses del siglo XVII se mostraban mucho más satisfechos de sí mismos que los escolásticos medievales en su creencia de que la razón y la investigación realizada como es debido nunca chocarían con el dogma religioso. En la Edad Media creían que la fe debía pronunciarse allí donde la razón fuera incapaz de decidir: y que en muchos casos la fe incluso debía prevalecer sobre la razón. ¿Por qué no iba a ser así? El poder y los propósitos de Dios no podían medirse en términos humanos, y del mismo modo que los misteriosos trabajos de la providencia y de los milagros constituían un desafío a la lógica y a la marcha normal de la naturaleza, también esta marcha normal debía considerarse a menudo como incomprensible para el hombre.

Pese a ser objeto de frecuentes denuncias, los ateos eran un grupo minúsculo, casi inexistente, en el siglo XVII. Con frecuencia los que eran denunciados como ateos, cual es el caso de Spinoza, por ejemplo, no lo eran en absoluto. Los filósofos de la naturaleza se contentaban con preferir las creencias ortodoxas de sus países respectivos y eran sinceros al dar a la verdad religiosa una categoría supe-

rior a la natural: el Sermón de la Montaña poseía una autoridad incomparablemente mayor que los sermones de las piedras y los arroyos. Lo cual no quiere decir que a los hombres, ya fueran teólogos, obispos o incluso papas, por ser humanos, no se les pudiera considerar responsables de haber cometido errores graves. En principio no podía haber ningún conflicto general entre ciencia y religión, tanto porque la importancia suprema del cristianismo era reconocida universalmente como porque nadie aceptaba una medida distinta de la verdad: no era posible que los mensajes escritos por Dios en las piedras y los arroyos, para que los hombres los leyesen, fueran mensajes distintos de los de la Biblia. Si parecía existir tal discrepancia, la causa tenía que ser la debilidad del intelecto humano. Aunque un teólogo se especializara en unos estudios y un filósofo de la naturaleza en otros, no había ninguna barrera entre unos y otros y, de hecho, el fomento del amor y del temor de Dios era la razón más universal para el estudio de la naturaleza; muchos matemáticos y experimentadores eran clérigos y algunos, como Isaac Barrow, eran cuando menos tan famosos por sus sermones como por sus teoremas. Los escritos devocionales de Robert Boyle, que hoy resultan imposibles salvo para el erudito más resuelto despertaban gran admiración. Para él, al igual que para Newton y muchos otros, el maridaje de consideraciones científicas y religiosas —tratar de Dios en relación con la apariencia de las cosas de este mundo material— formaba ciertamente parte de la filosofía natural.

Asimismo, los filósofos de la naturaleza ni en sueños habrían impugnado la validez de leyes morales y religiosas universales, pues eran todavía más rigurosas que las leyes científicas. A la mentalidad protestante de finales del siglo XVII los juicios sobre Bruno y más tarde sobre Galileo podían parecerle llenos de errores humanos además de expresión de la perspectiva estrecha, miope, de la iglesia no reformada, pero nadie ponía en tela de juicio el que Bruno y Galileo se hallaran sujetos a la ley moral. El «científico», por sus habilidades y conocimientos, no estaba exento de los tribunales que podían juzgar a otros hombres. Ningún seguidor de los puntos de vista de Galileo creía que todo hombre poseyera libertad completa de pensamiento y expresión, ni dudaba del derecho de las sociedades «justas» a imponer restricciones «justas» en la comunicación de ideas perniciosas o irreligiosas, y los puritanos que quemaban brujas probablemente habrían quemado a Bruno con la misma alegría si hubiera predicado

su filosofía mágica entre ellos. No parece que el propio Galileo, aunque nunca renunció a su convencimiento interior de rectitud, tanto en sus opiniones científicas como en su intento de apartar a su iglesia del error, pusiera en duda el principio de que las autoridades eclesiásticas tenían derecho a censurar sus argumentos. Vivió y murió en la fe católica y, según la biografía de Viviani, se arrepintió de su propia temeridad. Cuando se retractó ante la amenaza de horrendos castigos, puede que se sometiera también a la creencia, a la sazón universal, de que las verdades morales y religiosas son superiores a las científicas, como sometiéndose a una debilidad natural. Lo único que podía hacer Galileo era lamentarse de los débiles intelectos de aquellos a quienes correspondía la tarea de comparar las citas bíblicas con la razón científica.

Aunque las proclamas defensivas del Santo Oficio no se oponían a ningún hecho científico positivo, y en el caso de Bruno no iban en absoluto dirigidas contra la ciencia, surtieron un profundo efecto en el movimiento científico, especialmente en Italia. Por regla general, se interpretaban como una declaración terminante de la iglesia católica en contra de la hipótesis copernicana y hay pruebas de que algunos filósofos (por ejemplo, Descartes) que estaban dispuestos a apoyar sin disimulo el modelo heliostático se vieron obligados artificialmente a expresar sus ideas en términos reservados y ambiguos. Algunos astrónomos activos como Giambattista Riccioli (1598-1671) y Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) —el último en París— defendieron lealmente el sistema geocéntrico de Tycho cuando quizá la lógica de su propia ciencia los habría llevado en la dirección contraria. Parecía que las innovaciones de la filosofía natural iban a producir brotes de opiniones peligrosas y heréticas, como los reaccionarios predecían desde hacía tiempo. A causa de ello, las innovaciones se hicieron especialmente sospechosas en Italia, donde los hombres de mentalidad original tuvieron que aprender a buscar aliento y críticas positivas en el extranjero. Incluso en Inglaterra los enemigos de la recién fundada Royal Society afirmaron que los métodos de ésta subvertían las enseñanzas de la iglesia anglicana. Durante un tiempo todo rasgo de originalidad en el pensamiento astronómico fue blanco de un odio como no se había visto desde principios del siglo XVI. Pero las críticas provocaron una reacción vigorosa en hombres como Galileo y Kepler. La situación obligaba a defender con

eficacia las nuevas doctrinas; ya no era posible la coexistencia pacífica de los dos sistemas del mundo.

La evolución prenewtoniana de la astronomía heliostática tuvo lugar en cuatro etapas principales. La primera fue la disolución de los prejuicios contrarios a la idea de que la Tierra se movía, para lo cual hizo falta una crítica detenida de todas las ideas cosmológicas a fin de crear una pauta nueva en la que dicho movimiento dejara de parecer inverosímil, así como desacreditar de manera general la autoridad de Aristóteles. Este objetivo fue origen de la segunda e importantísima etapa, durante la cual se revisaron las teorías físicas para demostrar que no eran válidos los reparos a la hipótesis copernicana nacidos de fenómenos mecánicos terrestres. En tercer lugar, la nueva astronomía se vio muy enriquecida por la observación cualitativa, lo cual daba a entender que las enseñanzas antiguas eran muy insuficientes. En cuarto lugar, la observación cuantitativa exacta aportó materiales inéditos para calcular de nuevo las órbitas planetarias, lo cual hizo que se abandonara el antiguo preconcepto a favor del movimiento circular perfecto y que se enunciaran nuevas leyes matemáticas. Kepler habría podido expresar sus descubrimientos empleando los términos del sistema geostático; pero como Kepler era un copernicano acérrimo, construyó su discurso del sistema solar de tal modo que fortaleciese aún más la hipótesis heliostática. Estas cuatro etapas duraron en total más o menos medio siglo (*c.* 1580-1630), mientras que su asimilación y, sobre todo, el reconocimiento gradual de las leyes keplerianas del movimiento planetario tardó una generación más. A mediados del siglo XVII la naturaleza del problema volvió a sufrir un leve cambio bajo la influencia de la filosofía natural de Descartes, que tendía a aumentar la disparidad entre el enfoque natural-filosófico y el enfoque matemático-astronómico, disparidad que más bien pareció disminuir a causa de los descubrimientos realizados durante el primer tercio de siglo.

Las aportaciones de Galileo a las tres primeras etapas fueron de gran importancia: la cuarta no recibió casi nada de la observación cuantitativa. Galileo no era astrónomo en el sentido que se daba a la palabra antes de entonces, nunca le interesaron los procedimientos tradicionales de la astronomía de posición, pero como filósofo aplicó nuevas técnicas astronómicas, la mayoría de ellas inventadas por él mismo, al examen de los problemas cosmológicos. Antes de 1609 el objeto principal de sus estudios era la mecánica, como hemos visto.

No obstante, había enseñado «la esfera» o la astronomía elemental como profesor particular en Padua y cuando en 1604 apareció una estrella nueva («la supernova de Kepler») dedicó tres lecciones públicas (que se han perdido) a los problemas de su naturaleza y posición. Naturalmente, defendió a los matemáticos contra los filósofos arguyendo que las estrellas nuevas, así como los cometas, eran fenómenos celestes en vez de atmosféricos. No es probable que en esta ocasión Galileo indicase su preferencia por el sistema copernicano, ya que tal preferencia no tenía nada que ver con el problema de la estrella nueva, pero sí lo es que hubiese cambiado de parecer unos ocho o nueve años antes. En todo caso, cuando en 1597 recibió un ejemplar del *Mysterium cosmographicum*, de Kepler, publicado un año antes e introducido en Italia por un amigo del autor, Galileo escribió a éste dándole las gracias (pues creyó equivocadamente que el libro era un obsequio personal para él). En esta carta Galileo se declaraba copernicano secreto. No tenemos más datos relativos al hecho ni es probable que Galileo llegara alguna vez a profundizar en los detalles de la astronomía matemática heliocéntrica tal como la expusieron Copérnico o Kepler; lo que le atrajo fue el esquema general.

Seguidamente, durante una visita a Venecia en julio de 1609, Galileo tuvo noticia de que un francés había traído un catalejo a la ciudad. El catalejo era una novedad holandesa y lo habían visto unos amigos de Galileo. Éste se apresuró a volver a casa sin examinar personalmente el catalejo y, reflexionando sobre las propiedades de las lentes —las convexas hacen que los objetos parezcan más grandes pero borrosos; las cóncavas, más pequeños pero claros—, hizo una copia del invento holandés, que era un telescopio pequeño y deficiente, de objetivo convexo y una lente ocular cóncava, que daba una imagen vertical. (Hans Lipperhey de Middelburg había solicitado patente para un instrumento parecido en octubre de 1608; curiosamente, la tradición de la óptica práctica de la que nació el catalejo de aumento había pasado de Italia a los Países Bajos).[6] El 21 de agosto Galileo volvía a estar en Venecia con un instrumento perfeccionado que ampliaba unas ocho veces el tamaño de los objetos y que impresionó mucho a los caballeros y mercaderes de la ciudad: el gobierno

6. Albert Van Helden, *The invention of the telescope*, *Trans. Amer. Phil. Soc.*, 67 (1977), cuarta parte. Pretendientes rivales (pero posteriores) fueron Jacob Adriaenszoon Metius de Alkmaar y Sacharias Janssen también de Middelburg.

prometió doblarle el sueldo. A principios de noviembre la ampliación era ya de veinte veces; en enero de 1610 terminó un telescopio de treinta aumentos, su mejor instrumento.

Meses y meses de pulir lentes y demostrar los resultados precedieron a la primera observación astronómica de la Luna por parte de Galileo el 1 de diciembre de 1609. Galileo no fue el primero en apuntar el telescopio hacia los cielos; el matemático inglés Tomás Harriot (1560-1621) había hecho lo mismo el verano anterior, probablemente utilizando un instrumento inferior. Se conservan varios mapas lunares de Harriot. También estudió, valiéndose de telescopios mejores fabricados por Christopher Tooke, los satélites y las manchas solares de Júpiter. A diferencia de Galileo, Harriot no publicó nada, por lo que su trabajo no es conocido. Galileo publicó el primer informe sobre sus asombrosas observaciones en marzo de 1610, al cabo de sólo cuatro meses. El *Sidereus nuncius* («El mensajero sideral») fue el primer libro de Galileo; pese a su brevedad, ninguna obra científica ha contenido jamás noticias más inesperadas para el lector medio. Galileo demostró que la Luna era rugosa como la Tierra, con rasgos superficiales tales como montañas y valles y quizá mares; calculó la altura de las montañas guiándose por la longitud de sus sombras. Su telescopio resolvió parte de la Vía Láctea en un denso racimo de estrellas y mostró que por doquier había estrellas diminutas que el ojo no podía ver sin ayuda. Galileo describió detalladamente cómo Júpiter estaba rodeado por cuatro compañeros hasta entonces insospechados, los «Astros mediceos», como los llamó en honor de la Casa de Toscana; los vio por vez primera a comienzos de enero de 1610 y tardó varios días en comprender que giraban perpetuamente alrededor del planeta. Galileo comentó que tal vez serían un consuelo para aquellos copernicanos a quienes turbaba la singularidad de la Tierra por cuanto ella sola poseía una Luna. En aquel momento y durante la mayor parte de su vida Galileo observó con mucha atención los movimientos de los satélites de Júpiter, tratando de reducir a reglas sus apariciones y desapariciones: confiaba en medir la longitud en el mar utilizando como relojes los satélites que giraban rápidamente. En Saturno detectaría Galileo una peculiar variación de forma —que medio siglo después se interpretó como un anillo plano circundante— mientras que en Venus distinguió fases parecidas a las de la Luna. Era la demostración de que Venus se hallaba en órbita alrededor del Sol y no entre la Tierra y el Sol.

Galileo fue también uno de los primeros en observar las manchas solares, que a veces, por supuesto, se observan a simple vista: Kepler no había acertado a identificar el fenómeno cuando buscaba un tránsito de Mercurio de lado a lado del Sol en 1607. Johann Fabricius fue tal vez el primero que observó una mancha solar, mientras que Cristóbal Scheiner escribió el libro más grueso sobre ellas, pero el primero en percatarse de su trascendencia astronómica, puesto que indicaban cambios en la superficie del Sol y también que éste giraba sobre un eje, fue Galileo.

Casi todos los nuevos descubrimientos relativos al sistema solar que podían hacerse con un telescopio poco potente los llevaron a cabo Galileo y unos cuantos astrónomos más a partir de 1610. Para los siguientes —la resolución de los anillos de Saturno y el descubrimiento de su satélite Titán, la observación de la gran mancha roja en Júpiter, etcétera— hicieron falta telescopios mejores, que estuvieron a disposición de los astrónomos a partir de 1645 aproximadamente; todos ellos eran del tipo «kepleriano» o «astronómico» con dos o más lentes convexas. Como es natural, esta rama nueva y cualitativa de la astronomía despertó muchísimo interés en toda Europa y se llevaron a cabo muchos trabajos, como el laborioso trazado de mapas de la topografía lunar que realizaron Johannes Hevelio (1611-1687) —rico cervecero de Danzig que instaló un excelente observatorio— y Riccioli (que aportó nombres, para sendos cráteres, como Copérnico y Mar de la Tranquilidad, que los astronautas norteamericanos popularizarían). La astronomía telescópica y el viejo asunto de establecer posiciones midiendo ángulos siguieron claramente diferenciados hasta las postrimerías del decenio de 1660, momento en que se inventaron los micrómetros para los telescopios más potentes y se instalaron miras telescópicas en los instrumentos destinados a medir ángulos. El resultado fue que la precisión aumentó entre diez y cien veces. Mientras tanto, el telescopio demostró casi de golpe lo inadecuadas que habían sido todas las explicaciones filosóficas (y populares) del universo. También demostró cuántas cosas se les habían escapado a los innovadores del siglo anterior, como Copérnico y Tycho Brahe.

El primero había dejado como estaban las ideas sobre la naturaleza física de los cielos, exceptuando algunas alusiones a la posibilidad de que la Luna y los planetas fueran cuerpos compuestos de materia normal y poseedores de gravedad propia. A los planetas

todavía los transportaban esferas quintaesenciadas, lo cual dejaba sin resolver el problema de la Tierra, que evidentemente carecía de esfera. Tycho Brahe, por otro lado, había denunciado públicamente las esferas alegando que su solidez no concordaba con el paso de los cometas por el cielo y, de hecho, tampoco concordaba con el entretejido de su propio sistema geoheliocéntrico (figura 5.1). También había dado un paso firme hacia la homologación de la Tierra y los cielos al mantener que las estrellas nuevas (como en 1572) y también los cometas (como en 1576) eran verdaderos cuerpos celestes, esto es, podían producirse cambios y apariciones inesperadas en las regiones que, según los filósofos, eran eternamente iguales y totalmente constantes en sus movimientos. Ahora bien, a cualquier persona que estuviera dispuesta a pensar los descubrimientos que siguieron a la invención del telescopio le sugerirían una serie de pensamientos a la vez antiaristotélicos y no copernicanos. Evidentemente, los cielos eran mucho más complejos de lo que suponían los sistemas astronómicos. Parecería que las estrellas no estaban muy cerca ni eran infinitamente remotas, sino que estaban distribuidas por el espacio mucho más allá de Saturno y eran increíblemente numerosas. Habría que entender todos los planetas y la Luna como cuerpos oscuros (quizá no distintos de la Tierra si ésta pudiese verse desde lejos) que brillaban gracias a la luz reflejada del Sol, que a su vez no era un fuego invariable e inmaculado. Estos pensamientos tendían a alguna conclusión general: que el universo era una estructura física, no compuesta de luz y una materia totalmente distinta de la materia de la región terrestre, sino más bien de dos tipos de cuerpo físico. El primero, las estrellas, eran fuentes incandescentes de luz y claramente físicas toda vez que no eran invariables. El segundo, del que podía averiguarse más, eran los planetas, cuerpos físicos que en esta etapa eran prácticamente indistinguibles de la Tierra misma a la que ya se podía situar sin titubeos en la clase de los satélites solares por razones físicas y por su movimiento. Por lo tanto, la astronomía física fue una creación del telescopio, pues en el pasado el único objetivo de la ciencia astronómica era el análisis de las posiciones y los movimientos de los cuerpos celestes sin prestar atención a su naturaleza, que quedaba abandonada a las especulaciones de los filósofos, a la vez que la astrología abarcaba las supuestas influencias que estos cuerpos ejercían en la región terrestre. El concepto de astronomía física o de mecánica celeste (que vino más tarde) era del todo

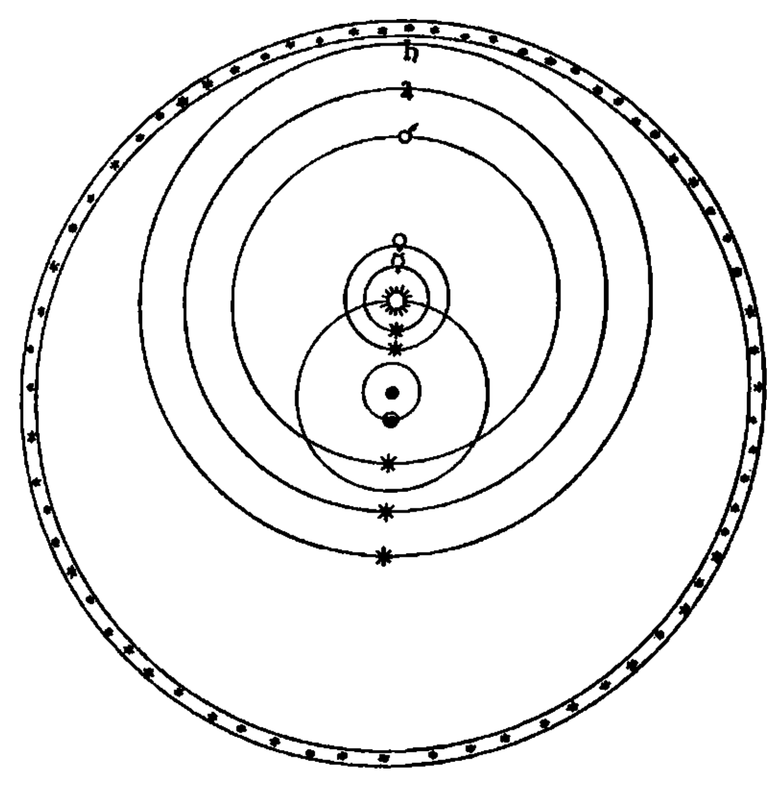


FIGURA 5.1

El sistema del mundo de Tycho Brahe, 1588

Compárese con la figura 2.4 del cap. 2.

incompatible con el trasfondo filosófico de la astronomía práctica del siglo XVI, y fue necesario reinterpretar bajo esta nueva luz el universo heliostático de Copérnico.

Esta reinterpretación la hizo Galileo en su *Diálogo sobre los máximos sistemas: ptolemaico y copernicano* (1632), que fue, por consiguiente, mucho más que una defensa del sistema matemático heliocéntrico definido por Copérnico. Por vez primera Galileo dio a

dicho sistema existencia filosófica y sustancia física. Sobre todo demostró cómo los nuevos movimientos de la Tierra postulados por Copérnico podían concordar con un tratamiento del movimiento en general que era diferente del aristotélico. Sin embargo, en otro respecto el *Diálogo* no iba más allá que el *De revolutionibus* en lo que se refiere al movimiento, esto es, a los movimientos definidos de los cuerpos celestes. Galileo no tenía nada que decir acerca de las complejidades del movimiento planetario con las que los matemáticos llevaban luchando dos mil años y a las que su contemporáneo Kepler dedicaría su vida. Mientras que Copérnico y después de él Kepler desafiaron directamente la obra maestra de Ptolomeo, que parecía definitiva, el blanco de Galileo era Aristóteles, el filósofo. Galileo no respondió a la pregunta de cómo se mueven los planetas y qué es lo que los mueve. De hecho, parece no creer siquiera necesario formular tales preguntas, aunque el título mismo del *Diálogo*, con su alusión a sistemas de astronomía *matemática*, exige que se formulen.

Basando los argumentos en este silencio, en el apoyo obvio que Galileo presta a Copérnico y en su escepticismo ante el «neocopernicanismo» de Kepler (véase más adelante), lo único que podemos suponer es que Galileo juzgó satisfactorio el análisis copernicano. Ello no le hacía declararse necesariamente a favor de todas las complejidades orbiculares de Copérnico; la trayectoria real de un planeta en el espacio (según Copérnico) describe casi un círculo; tal vez Galileo supuso que la diferencia era fruto de algún error astronómico, pues en otras partes del *Diálogo* se hace evidente la desconfianza que en él inspira la precisión de los astrónomos observadores. Sin duda Kepler habría deleitado a Galileo con su descubrimiento de que es el Sol, y no la órbita del centro de la Tierra (como suponía Copérnico) el eje de todo el sistema (Galileo no dice que esté al corriente de ello). Dicho de otro modo, es muy posible que Galileo hubiera vuelto a una sencilla y elegante idea «platónica» de órbitas circulares excéntricas, del mismo modo que «resucitó» explícitamente (de hecho, la inventó) una idea «platónica» de que las velocidades orbitales planetarias las hubiera podido alcanzar la caída libre, hacia el Sol, de todos los planetas desde un punto único del espacio, apartándose cada uno del descenso para entrar en su órbita a la distancia apropiada.

De haber adoptado este punto de vista (cosa que no hace explícitamente), Galileo habría tenido tan pocos inconvenientes como

Copérnico o William Gilbert en calificar el movimiento planetario circular de «natural», es decir, sin necesidad de explicación (una vez generado del modo «platónico» que acabamos de describir). En las primeras páginas del *Diálogo* Galileo examina el razonamiento en virtud del cual se arguye que los cielos y la región terrestre son distintos, tanto en sus movimientos como en sus naturalezas. Reconoce que los movimientos de los cuerpos celestes son perfectamente circulares, puesto que sólo así podía conservarse sin cambio la pauta de los cielos, y que del movimiento rectilíneo «a lo sumo se puede decir que es asignado por la naturaleza a sus cuerpos y las partes de éstos, en el momento en que estén fuera de sus lugares apropiados, constituidos en una posición pervertida, y por esa causa necesitando que se les conduzca por la vía más corta a su estado natural». Pero niega que los cuerpos terrestres se muevan en línea recta, por lo que la antítesis no es cierta. En cuanto a la aseveración aristotélica de que los elementos se acercan y alejan directamente del centro del universo en líneas rectas, Galileo replica:

> Si otro dijera que las *partes* de la Tierra no se mueven hacia el Centro del Mundo, sino a unirse con su *Todo*, y que por esta razón se inclinan naturalmente hacia el centro del Globo Terrestre [idea ésta que recuerda claramente a William Gilbert], mediante la cual inclinación conspiran para formarla y preservarla, ¿qué otro *Todo* o qué otro Centro encontraríais para el Mundo, al cual todo el Globo Terrenal, siendo sacado de allí, trataría de volver, de tal modo que la razón del *Todo* podría ser como la de sus *partes*? Se puede agregar que ni Aristóteles ni vosotros podéis probar jamás que la Tierra esté *de facto* en el centro del Universo; pero si algún Centro se le puede asignar al Universo, más bien encontraremos el Sol situado en él.

Cierto número de proposiciones de la mecánica se elucidan detenidamente a la vez que se hace aparente que la oposición del copernicano a la visión tradicional del mundo dependerá del análisis completamente distinto de las propiedades de las cosas que se mueven. La mecánica, de hecho, es el fundamento de la cosmología:

> ... ninguna de estas condiciones por medio de las cuales Aristóteles distingue los Cuerpos Celestes de los Elementales (es decir, terrestres), tiene otro fundamento que lo que él deduce de la diversidad

> del movimiento natural de aquellos y de estos; puesto que se niega que el movimiento circular sea peculiar de los Cuerpos Celestes, y se afirma que concuerda con todos los Cuerpos naturalmente movibles, es provechoso sobre la consecuencia necesaria decir o bien que los atributos de generable o ingenerable, alterable o inalterable... igual y comúnmente con todos los cuerpos mundanales a saber, así como con los Celestes como con los Elementales; o que Aristóteles ha deducido mal y erróneamente aquellos del movimiento circular, que él ha asignado a los Cuerpos Celestes.[7]

Esto es, si la Tierra se mueve, toda la teoría física de la cosmología de Aristóteles es infundada. Poco después de esto, Galileo hace que el comentario general de la «arquitectura» del mundo se rompa al chocar con el argumento de que caliente y frío no son cualidades propias de los cuerpos celestes. Esta clase de aforismo (comenta) conduce a «un océano sin fondo, donde es imposible llegar a la playa; porque ésta es una Navegación sin Brújula, Estrellas, Remos o Timón». Por consiguiente, el debate se desvía hacia las pruebas a favor o en contra de la invariabilidad de los cielos, se comentan extensamente las nuevas observaciones efectuadas con el telescopio y se hace una comparación detallada entre las propiedades ópticas de la Tierra y la Luna. De esta comparación se deduce su similitud física. Galileo señala incidentalmente la futilidad de la idea de que en la región celeste los cambios serían imposibles porque no tendrían ninguna función en el contexto de la vida humana, ya que el propósito de los cuerpos celestes lo cumpliría de modo suficiente su movimiento regular que da luz. Tampoco perdona el curioso criterio según el cual la inmutabilidad estéril era una señal de perfección: antes bien, si la Tierra hubiera continuado siendo «un inmenso Globo de Cristal, en donde jamás nada hubiera crecido, alterado o cambiado, lo hubiese considerado un terrón sin gran beneficio para el Mundo, lleno de ocio, y en una palabra, superfluo». Con apartes como éstos, en un debate estrictamente científico, se atacaban los valores del pensamiento convencional haciendo que su textura pareciese débil y forzada.

El segundo *Diálogo* empieza burlándose cáusticamente de la necia deferencia ante la autoridad de Aristóteles: «¿Qué es esto sino

7. Conservo aquí el lenguaje del traductor inglés de Galileo en el siglo XVII, Thomas Salusbury, véase Giorgio di Santillana, *Dialogue on the great world systems in the Salusbury translation*, Chicago University Press, Chicago, 1953, pp. 37, 40, 45

hacer un Oráculo de un Leño, y correr a éste en busca de respuestas, temer a eso, venerar y adorar a eso?». Los que utilizan tales métodos no son filósofos, sino historiadores o doctores de memoria: nuestras disputas, dice Galileo, son en torno al mundo sensible, o en torno a un mundo de papel. En cuanto al movimiento de la Tierra, tiene que ser totalmente imperceptible para sus habitantes, «y como si no fuera en absoluto, mientras sólo tengamos en cuenta las cosas terrestres», pero tiene que darse a conocer por medio de alguna aparición común de movimiento en los cielos; y existe tal cosa.[8] Pero hasta donde el movimiento es relativo, la ciencia que trata de él no puede decidir si lo que en realidad se mueve es la Tierra o el cielo. Así, pues, la opinión depende de lo que sea «creíble y razonable». Es más razonable que gire la Tierra en lugar de todo el cielo; que las órbitas celestes no hagan movimientos contradictorios; que la esfera más grande no dé vueltas en el tiempo más corto; que las estrellas no estén obligadas a moverse a velocidades distintas con la variación de los polos. En todos estos aspectos el concepto galileano de lo «razonable» supone una perspectiva diferente de la que tenían los filósofos anticopernicanos; pero a Simplicio no se le permite argumentar el asunto y se limita a comentar que «Lo que importa es hacer que la Tierra se mueva sin un millar de inconvenientes». En el primer grupo de «inconvenientes» que deben resolverse están los habituales fenómenos mecánicos, la piedra que cae verticalmente, la bala de cañón que llega tan lejos hacia el este como hacia el oeste, cosa que se juzgaba imposible si la Tierra se movía debajo. Como es natural, Galileo creyó necesario hacer una larga exposición de sus nuevas ideas sobre la mecánica, enunciando en ella una versión parcial de la ley de la inercia. Gran parte de sus razonamientos contra la doctrina aristotélica del movimiento ya la habían anticipado exactamente los filósofos medievales del *impetus*. Vemos un largo estudio de la llamada desviación de los cuerpos que caen, problema éste que atrajo la atención, de forma intermitente, durante todo el siglo XVII, pues ofrecía una posible prueba de la rotación de la Tierra. Algunos astrónomos (Tycho Brahe, por ejemplo) habían alegado que si se dejaba caer libremente una piedra desde lo alto de un mástil de un barco en movimiento, la piedra no caería al pie del mástil, sino muy hacia popa. Galileo demuestra que esto no concuerda con los verda-

8. *Ibid.*, pp. 125 ss.

deros principios de la mecánica. A pesar de la exclamación de Simplicio «¿Cómo es esto? No habéis hecho un centenar, ni una única prueba de ello, ¿y tan confiadamente afirmáis que es cierto?» Galileo dice al respecto que para contestar correctamente esta pregunta él confía en un razonamiento *a priori*. «Estoy seguro de que el efecto será como os digo, pues es necesario que así sea, y digo también que tú mismo sabes que no puede caer de otra manera, por mucho que finjas o parezcas fingir que no lo sabes.»[9] Hubiera el propio Galileo efectuado o no este experimento crucial —como sin duda lo hicieron satisfactoriamente otros— en el libro hace lo indecible por presentar los experimentos como superfluos, aunque anteriormente se ha esmerado en señalar que los experimentos son siempre preferibles a la raciocinación. Éste no es más que un ejemplo, un ejemplo extremado, de ambigüedad epistemológica en Galileo, cuya causa es su incapacidad para hacer del todo compatibles las pretensiones rivales de la racionalidad matemática y la experiencia visual.

O de la ilusión y la realidad, cabría decir. Porque Galileo tiene que demostrar que en el contexto copernicano todo movimiento observado es ilusorio y debe entenderse a la luz de la razón. No podemos observar la trayectoria «verdadera» de un cuerpo, aunque pudiéramos definirla. El descenso aparentemente vertical de la piedra sobre la cubierta del barco, paralelamente al mástil, es una ilusión que un observador situado en tierra podría (en principio) detectar; pero la trayectoria que ve este observador «inmóvil» también es una ilusión, aparente para un tercer observador fijo en el espacio. Así, pues —pasando del mástil de un barco a una torre construida sobre la Tierra— Galileo escribe:

> Sólo vemos el sencillo movimiento de descenso [de una piedra que cae]; toda vez que el otro movimiento circular común a la Tierra, la torre y nosotros mismos, sigue siendo imperceptible y como si nunca existiera, y permanece perceptible para nosotros el de la piedra, sólo que nosotros no participamos en él, y por esto, el sentido demuestra que lo hace en línea recta, siempre paralelo a dicha torre.[10]

9. *Ibid.*, p. 159.
10. *Ibid.*, p. 177.

Habría sido absurdo que Galileo se apoyara en el empirismo en este estudio de la trayectoria de caída de las piedras, pues su objetivo era precisamente subrayar la racionalidad del movimiento y no descubrir si algo que un marinero descuidado dejaba caer desde el cordaje iba a parar a cubierta o se hundía en el mar.

Sin duda la más elegante, y quizá la más interesante, de todas las ideas sobre el movimiento que debemos a Galileo es esta de su relatividad, o más rigurosamente, de la independencia de los movimientos dentro del conjunto de un marco dado. Galileo ilustró apropiadamente la idea mediante la imagen de un hombre que está en el camarote de un barco que navega *sin dar el menor bandazo*; todo cuanto hace el hombre —por ejemplo, tirar una pelota al suelo para que rebote o lanzar una moneda al aire— sucede como sucedería en una habitación de su casa: la experiencia no puede decidir si el «marco» se mueve tranquilamente o está en reposo. Ya había transcurrido mucho tiempo desde que se reconociera que el movimiento puede ser una ilusión subjetiva —¿avanza el barco o retrocede la costa?—, pero Galileo fue el primero en probar que no puede hacerse una distinción *objetiva* entre realidad y ficción.

A falta de aceleraciones, diríamos nosotros, aunque Galileo no lo dice y la imprecisión con que habla del movimiento suave y natural es importante. Decidir si el camarote de un navío se mueve suavemente describiendo un círculo (sobre el globo) o en línea recta puede parecer de lo más pedantesco; sin embargo, ciertas máquinas que hay en los parques de atracciones demuestran que el asunto no carece de interés. Galileo no afrontó de lleno este problema ni lo resolvió. Nunca dice que los movimientos suaves y naturales deben ser en principio largas líneas rectas, ni que los movimientos que describen curvas deben llevar aparejada una aceleración y, por ende, fuerzas. En general, el lector de los libros de Galileo sacaría la conclusión de que la forma geométrica de un movimiento no importa mucho ni es interesante, porque estas formas son ilusorias, como hemos visto. Para un observador sujeto a la tierra los proyectiles relacionados con la tierra se mueven describiendo parábolas, pero no así para un observador fijo en el espacio; tal vez, insinúa Galileo, *realmente* se mueven en círculo.[11] Hay un hecho curioso que pone de relieve la incapacidad de Galileo para hacer plenamente compatibles

11. *Ibid.*, pp. 178-180.

el mundo a pequeña escala de la experiencia inmediata, un mundo «arquimediano» y rectilíneo, y el cosmos a gran escala, copernicano y circular del que ahora la Tierra era miembro de número: que (como Marin Mersenne señalaría con cierta repugnancia en 1644) en el *Diálogo* no preste la menor atención a la parábola como fruto de movimientos uniformes y acelerados simultáneos. Es en verdad imposible completar esta tarea, la de hacer compatibles estas dos cosas, en términos exclusivamente cinemáticos, sin aludir a las fuerzas operativas y sus direcciones.

Sin embargo, lo más importante del *Diálogo* es que, con una sola excepción, los reparos mecánicos que podrían ponerse a la idea se despachan apelando a los principios de la inercia y de la relatividad del movimiento que Galileo ilustra con varios ejemplos ingeniosos. Galileo toca brevemente otros problemas de la mecánica que son subsidiarios del argumento principal, tales como el concepto del momento estático, el isocronismo del péndulo y la ley de los cuerpos que caen, que el autor cita sin aportar pruebas. Para replicar al reparo de que la rotación de la Tierra provocaría el derrumbamiento de edificios, etc., Galileo investiga por primera vez las fuerzas centrífugas. Valiéndose de la idea de las fuerzas virtuales, enunciada en relación con el momento estático, prueba que si las velocidades periféricas o lineales son iguales, la fuerza es inversamente proporcional al radio. Señala que la velocidad angular de la Tierra es muy pequeña y su radio es muy grande: por lo tanto, la fuerza establecida no bastaría para superar la gravedad natural de un cuerpo. Del argumento de Galileo («así, podemos concluir que la revolución de la Tierra no sería más capaz de sacar piedras que cualquier ruedecita que vaya tan despacio, tanto que da una vuelta en veinticuatro horas») se desprende que no se daba cuenta de que cuando las velocidades *angulares* son iguales, la fuerza centrífuga es *directamente* proporcional al radio. De hecho, hasta mucho más tarde no se detectaron las fuerzas producidas por la rotación en las regiones ecuatoriales.

Ciertamente, la principal aportación galileana al debate cosmológico, después de sus descubrimientos con el telescopio, fue la extensa ilustración del acuerdo perfecto que existe entre la teoría copernicana de los planetas y una filosofía natural que es enteramente racional y en parte matemática. La consecución del acuerdo exigía la suprema importancia de las matemáticas, tanto las matemáticas de la astronomía como las del movimiento, mientras que en el mundo

antiguo y en el medieval los matemáticos tenían que bailar forzosamente al son de la música que tocaban los filósofos. La mecánica de Galileo fue, pues, el complemento necesario de la astronomía de Copérnico y, aunque para los filósofos de la naturaleza del siglo XVII nada podía ser más sorprendente y grato que el descubrimiento de que los mismos principios mecánicos podían hacerse extensivos a los movimientos, tanto terrestres como celestes, a pequeña como a gran escala, el descubrimiento no fue fortuito ya que era precisamente este tipo de armonía el que buscaba Galileo (y Kepler), para justificar a Copérnico.[12]

No se trataba —como subraya con frecuencia Galileo en el *Diálogo*— de probar que la hipótesis copernicana era necesariamente cierta; pero, tras el reajuste de ideas físicas efectuado por él, podía demostrarse que cuando menos era tan plausible como la hipótesis ptolemaica. La teoría física del cosmos de Aristóteles, terrestre y celeste, era un conjunto integral; para Galileo la astronomía y la física eran tan independientes la una de la otra que reconocía que las observaciones puramente físicas no servían para determinar el sistema del mundo, pero no albergaba ninguna duda de que las leyes del movimiento podían aplicarse universalmente a cuerpos tanto celestes como terrestres. Una verdadera teoría mecánica, aparte de destruir por completo todas las objeciones físicas al sistema heliocéntrico, de hecho hacía que preponderasen las creencias a favor de dicho sistema.

En el tercer *Diálogo* Galileo examina los argumentos favorables y contrarios al movimiento anual de la Tierra. Empezando con consideraciones puramente astronómicas, muestra de manera clara la desconfianza que le inspiran las mediciones cuantitativas que se hacían en su propia época, aunque parte de ellas para confirmar que la nueva estrella de 1572 era en verdad celeste. Seguidamente explica la irradiación de luz, que exagera los diámetros aparentes de las estrellas y los planetas, y demuestra que las observaciones verifican el sistema copernicano. Galileo comenta luego, en una exposición elocuente y lúcida, el problema que plantea la ausencia de un paralaje estelar detectable. Él no era de la opinión de que las estrellas son infinitamente remotas, pero sí arguye que el tamaño del universo es

12. Werner Heisenberg, *Philosophic problems of nuclear science*, Faber, Londres, 1952, p. 35.

tal que sus dimensiones están más allá de las pautas humanas de magnitud. Si es posible comprender su inmensidad, entonces hacerla tan inmensa no es algo superior al poder de Dios; si su inmensidad rebasa los límites de la comprensión, no es menos presuntuoso suponer que Dios no podría crear lo que la mente es incapaz de comprender. Simplicio objeta que si hubiera una vasta región de espacio vacío entre la órbita de Saturno y las estrellas fijas, esta región sería superflua y carecería de un fin determinado. Esta objeción permite a Galileo condenar otra vez la introducción de razonamientos teológicos en la ciencia. Al parecer, piensa que pese a ser inmensa, la lejanía de las estrellas fijas no debe exagerarse y calcula que incluso en el supuesto de que la proporción entre el radio de la esfera estelar y el semidiámetro de la órbita de la Tierra fuera igual que entre ésta y el radio de la Tierra, una estrella de la sexta magnitud seguiría siendo menor que el Sol, el cual, según los cálculos de Galileo, tiene cinco veces y media el tamaño de la Tierra. La asiduidad y la habilidad de los astrónomos para hacer observaciones del paralaje estelar son en todo caso dudosas, ya que las observaciones exigirían una

> exactitud muy difícil de obtener, tanto en razón de la deficiencia de los instrumentos astronómicos sujetos a muchas alteraciones como a causa de el fallo de aquellos que los manejan con menos diligencia de la necesaria ... ¿Quién puede en un cuadrante, o sextante, que como máximo tendrá su lado de 3 o 4 *bracchia* de longitud, cerciorarse ... en la dirección de las miras, de no errar dos o tres minutos?

La explicación general galileana de la manera en que la teoría heliocéntrica «salva los fenómenos» tiene por modelo la copernicana, con la salvedad de que Galileo niega la realidad del tercer movimiento que Copérnico atribuía a la Tierra para explicar el paralelismo de su eje. Así, por ejemplo, el principio de la relatividad del movimiento resuelve la aparición de estaciones y retrogradaciones en los planetas. Pero Galileo no indica en ninguna parte que sus órbitas, que Copérnico consideraba excéntricas, sean otra cosa que puramente circulares alrededor del Sol, ni trata de justificar órbitas determinadas partiendo de los datos de la astronomía de posición. También difiere de Copérnico al pensar que los centros de las órbitas coinciden con el cuerpo del Sol. No puede decirse, pues, que en los *Diálogos*

Galileo mejorase el argumento copernicano en términos de astronomía técnica, excepto utilizando los nuevos datos cualitativos obtenidos con el telescopio, los cuales ya había comentado en sus escritos anteriores. De hecho, el modelo astronómico que se describe en ellos, un modelo sencillísimo, es del todo incompatible con la observación precisa. Es obvio que Galileo confiaba mucho más en la verdad del principio mecánico según el cual los cuerpos poseen la propiedad de la rotación inercial en un círculo perfecto que en la exactitud de las mediciones astronómicas. Característica de su método científico de abstracción era la posibilidad de analizar más fácilmente, así como de describir con lenguaje matemático-mecánico, una versión o modelo del fenómeno real que era menos compleja que los mismos fenómenos; y Galileo no fue siempre suficientemente consciente de la genuina trascendencia de la mayor complejidad. En este caso Galileo se dejó engañar, en parte por su definición imperfecta de la inercia (que rectifica sólo de manera implícita en su estudio de la fuerza centrífuga) y en parte por ideas cosmológicas que aún persistían. Es digno de atención el hecho de que, si bien no reflexiona sobre la realidad o irrealidad de las esferas, la palabra «esfera» la utiliza con naturalidad y sin comentarios. Galileo no creía más de lo que Tycho Brahe creyera mucho antes en que los cuerpos celestes se apoyan en orbes cristalinas sólidas, pero, según parece, Galileo, que enfocaba el problema de modo cinemático más que verdaderamente dinámico, no dedicó suficiente reflexión a las consecuencias de quitar las esferas celestes y dejar las estrellas y los planetas como cuerpos libres en el espacio. A diferencia de Newton, Galileo nunca comparó el movimiento de un planeta con el de un proyectil; a diferencia de Kepler, ignoraba que la geometría de las órbitas planetarias invalidaba toda clase de modelo esférico. A diferencia de ambos, rechazó la idea de que el Sol afecta los movimientos planetarios.

El *Diálogo* de Galileo puso fin a un período de más de veinte años durante el cual su preocupación principal, mejor dicho, su pasión, había sido la franca defensa de su propia perspectiva científica, de los descubrimientos que él mismo había hecho en los cielos y del copernicanismo. Su blanco más frecuente era la filosofía académica, pero no había titubeado en desafiar también el derecho de los críticos conservadores a citar contra él las Escrituras como abrumadora autoridad científica. La notoriedad que se ganó *El mensajero sideral*, empujada a alturas sin precedentes, hizo que el nombre de Galileo fuera

el más famoso entre los lectores de libros de Europa. Se marchó tres veces de Florencia para visitar Roma: la primera, en 1611, fue para demostrar las cosas que había visto con su telescopio ante los jesuitas del Collegio Romano, cuyo superior era Cristoforo Clavius, reformador del calendario (1582). Fue un gran éxito, pues los padres declararon que Galileo había dicho la verdad. Además, Galileo fue agasajado por la nueva Academia dei Lincei (Linces), fundada por el príncipe Federico Cesi, y nombrado miembro de la misma. En diciembre de 1615 Galileo, que estaba mal de salud, volvió a Roma en circunstancias más sombrías para defenderse de las acusaciones (formuladas públicamente en Florencia y comunicadas de forma privada a la Inquisición en Roma) de propagar ideas peligrosamente irreligiosas; en más de una ocasión ya había recibido discretos consejos de que hablase sólo como matemático y no se metiera en cuestiones de teología; en Roma, durante febrero de 1616, las autoridades decidieron condenar la estabilidad del Sol y el movimiento de la Tierra como creencias erróneas e incluir el *De revolutionibus* en el *Índice de libros prohibidos.*[13] De acuerdo con las instrucciones recibidas, el cardenal Bellarmino avisó privadamente a Galileo, obtuvo su sumisión así como la promesa de no albergar ni defender tales creencias. Además, un comisario de la Inquisición le ordenó allí mismo, en nombre del papa, que no albergara, defendiera o enseñara tales creencias de palabra o por escrito; es posible que esta última admonición se hiciera extraoficialmente, pero, a pesar de ello, consta en los anales. A principios de 1624 Galileo volvió a Roma una vez más para ver a Cesi y alardear de su recién inventado microscopio,[14] y también con un objeto más importante como era obtener permiso para escribir un nuevo libro sobre cosmología. Como resultado de seis audiencias con el papa Urbano VII, al que causó buena impresión, Galileo se fue con el permiso concedido (en lo que se refería a los razonamientos astronómicos y matemáticos), sin haber revelado la prohibición «extraoficial» pero expresa que le hiciera la Inquisición en 1616. El futuro libro era, por supuesto, el *Diálogo*, y Galileo se valió de subterfu-

13. Las frases vedadas a los ojos de los lectores católicos eran pocas, a saber: las del libro I en que Copérnico dice que el movimiento de la Tierra es físicamente real.

14. Se trataba de una forma modificada del telescopio galileano que permitía enfocar la imagen de un insecto colocado cerca del lente del objetivo. El modelo habitual de microscopio —que era un telescopio kepleriano modificado— se inventó por aquel entonces en Holanda.

gios para conseguir la autorización clerical para publicarlo. El libro no resultó como pensaba el papa. El tratamiento era popular en vez de matemático; se mofaba de los filósofos y parecía ridiculizar un argumento contra Copérnico que el papa había juzgado decisivo; proponía seriamente el movimiento de la marea como argumento para demostrar que la Tierra se mueve de veras. Es cierto que Galileo declaró oficialmente que no pretendía demostrar nada, mas para el lector que no fuese ingenuo sus sentimientos eran tan obvios como su poca disposición a aceptar la Biblia literalmente. Galileo vio cómo le estallaba en la cara el intento de publicar un libro desapasionado capaz de persuadir a los hombres racionales que había en la iglesia (y él creía que había tales hombres, hombres que le eran favorables) de la necesidad de aceptar el copernicanismo como hecho de la naturaleza. Su cuarta visita a Roma, en 1633, fue involuntaria. Salieron a relucir los expedientes de 1616 y todas las demás acusaciones; el papa se puso furioso y Galileo tuvo que arrepentirse y retractarse. Las decisiones de 1616 se decretaron con más firmeza que nunca. Galileo fue condenado al aislamiento en su casa del pueblo de Arcetri (a poca distancia del centro de Florencia) y se le prohibió comunicarse con otros eruditos, aunque nadie se preocupó de que este último castigo se cumpliera estrictamente. Tampoco nadie se enteró cuando el manuscrito de las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* fue sacado clandestinamente del país y publicado en los heréticos Países Bajos (1638). Desde luego, Galileo pensaba —y era cierto desde los sesenta y nueve años de edad— que su vida estaba en ruinas, empeorada por la mala salud y finalmente por la ceguera, pero realzada por la lealtad de los discípulos, los amigos y los admiradores.

La vida de Johannes Kepler (1571-1630) no tuvo un final más feliz pues, tras suceder a Tycho Brahe en el cargo de matemático imperial de Rodolfo II, sus últimos años fueron desgraciados a causa de la guerra de los Treinta Años (Kepler era protestante); después de mucho ir de un lado para otro, murió en una posada de Ratisbona, donde fue enterrado, aunque, como en el caso de la tumba de Mozart en Viena, se ignora dónde está la de Kepler.

Al igual que Galileo, Kepler trató de aliviar sus desgracias personales desplegando una incesante actividad de erudito, aunque con pocas esperanzas de conquistar un gran número de lectores con sus seis tratados de astronomía, dos de óptica y otras obras, todas ellas

idiosincrásicas, geométricas y difíciles, hasta el punto de que la aceptación de sus ideas se vio perjudicada por su forma de presentarlas. Kepler no esperaba que sus contemporáneos le entendieran: «He robado los vasos de oro de los egipcios para hacer con ellos un Tabernáculo para mi Dios lejos de los confines de la tierra de Egipto», escribió metafóricamente refiriéndose al libro que, añadió, podía ser «para que lo lean mis contemporáneos o la posteridad, no importa cuál; que el libro espere su lector durante cien años, si el propio Dios ha esperado 6.000 años a que su obra fuese vista».[15] Asimismo, era muy consciente de que, tras abandonar las combinaciones de movimientos circulares para representar las órbitas planetarias, ahora casi exigía lo imposible a la competencia matemática de los astrónomos, pues éstos no estaban del todo versados en las *Cónicas* de Apolonio de Perga, que hoy día siguen considerándose como uno de los textos matemáticos antiguos más difíciles. Tampoco sus ideas eran de un tipo que, una vez entendidas, resultaran fácilmente aceptables. Pues, aunque recordamos a Kepler como el matemático que descubrió las tres leyes básicas para describir el movimiento planetario —¡Newton diría en términos despreciativos que Kepler las había *adivinado*!— como resultado de decenas de millares de horas dedicadas a la reducción de observaciones y al cómputo, de hecho era un hombre de vívida y original imaginación científica que poseía fuertes intuiciones físicas sobre el funcionamiento del universo, intuiciones que guiaron sus trabajos matemáticos. Sin duda Kepler no habría conquistado fama inmortal si hubiese sido un simple matemático capacitado, como tantos otros de su época, entregado a la tarea de producir tablas.

Kepler siempre fue fiel a su principal objetivo —la revelación de la armonía y el orden profundos que hay en el universo heliocéntrico tal como Copérnico lo definió aproximadamente— y a los principios esenciales de su respuesta. En la universidad de Tübingen, donde estudió sobre todo teología, también cursó estudios de matemáticas con Miguel Maestlin (1550-1631), de quien adquirió unos conocimientos elementales de astronomía matemática que incluían una breve explicación del sistema copernicano (al dejar la univesridad, Kepler aún no había hecho un examen minucioso del *De revolutionibus*).

15. Kepler, *Gesammelte werke*, VI, p. 290. He aprendido mucho de las tesis sobre Kepler escritas por los doctores A. E. L. Davis y J. V. Field.

Kepler fue en seguida más allá de Maestlin y se aferró al sistema citado por considerar que era realmente cierto y que ofrecía una clave nueva para interpretaciones más amplias; luego decidió —tal vez con un poco de ayuda de sus superiores pastorales— renunciar a la vida de religión y dedicarse a las matemáticas. Su primer libro, *Misterium cosmographicum* (1596), escrito cuando daba clases en la ciudad austríaca de Graz, se publicó inmediatamente después de finalizar sus años de estudiante; y Kepler mantuvo una larga y fructífera correspondencia con Maestlin. Lo primero que le atrajo de Copérnico (como relata él mismo) era la elegancia física más que matemática de su visión; por consiguiente, creyó Kepler, convencido de la verdad del sistema, que sin duda era posible demostrarlo *a priori* —esto es, partiendo de algunos principios antecedentes— así como *a posteriori* basándose en observaciones hechas a la manera del propio Copérnico. (Esto, por supuesto, significa que el matemático lanza la pelota del filósofo fuera de la pista.) Podemos decir que los principios antecedentes de Kepler eran: 1) Dios creó el universo; 2) dado que la creación debe seguir un plan y Dios es pura inteligencia, Dios, al crear, siguió un plan racional; 3) dado que el plan de Dios es racional, también es inteligible para el hombre. De modo general, estos principios son indudablemente mucho más antiguos que Kepler y, desde luego, habrían encontrado gran aceptación en cualquier momento situado entre los siglos XVII y XIX. Palabras como «designio» y «plan» se hicieron estereotipadas. Para Kepler, sin embargo, significan, por así decirlo, los planos de trabajo del Divino Arquitecto, necesariamente geométricos y a menudo prefiere la palabra «Arquetipo» para expresar este sentido riguroso. Como dijo cuando el final de su vida ya estaba cerca: «El Creador no se aparta de su Arquetipo, siendo el Creador la verdadera fuente de Geometría y, como escribió Platón, entregado siempre al ejercicio de la Geometría».[16] Así, el cuarto y más importante de los principios antecedentes de Kepler, del cual se generará *a priori* el sistema copernicano, es que el plan divino o Arquetipo puede expresarse matemáticamente. Así que Kepler se remontó al origen de una de las raíces profundas de la ciencia moderna. La tarea inmediata, a su modo de ver, era explicar lo que Copérnico había aceptado tal cual: el número, las dimensiones y los movimientos de los planetas. Todas estas cosas eran cuantificables: la «cantidad»,

16. *Harmonices Mundi*, 1619; *ibid.*, IV, p. 299.

escribe, «fue creada al principio, con cuerpo, creándose los cielos en el segundo día». Pero hay más, algo que refleja el profundo misticismo religioso de Kepler, cuando explica: «Esto lo intenté porque me dio valor la hermosa armonía que existe entre las partes [del Universo] que están en reposo, el Sol, las estrellas fijas y el espacio intermedio, y Dios Padre, el Hijo y el Espíritu Santo».[17] Tomando los tamaños relativos de las orbes según los definió Copérnico, Kepler intentó sin éxito encontrar alguna proporcionalidad entre ellos o descubrir alguna pauta. Al no conseguirlo, se le ocurrió que ninguna serie o pauta podía definir sólo *seis* dimensiones. ¿Por qué no menos o más? Entonces, el 19 de julio de 1595, al trazar para sus estudiantes la pauta en que ocurría la gran conjunción alrededor del zodíaco, vio cómo el mismo triángulo repetido alrededor de un círculo define un segundo círculo, un círculo interior; un cuadrado hace lo mismo, pero las proporciones son diferentes. ¿Podía ser ésta la clave? Figuras planas de 3, 4, 5, 6... lados podían considerarse... pero, ¿por qué sólo seis de ellas? ¿Cuáles seis? De pronto lo vio; si, en vez de figuras planas, cogía sólidos, el único grupo de *cinco* sólidos regulares asociados con *cinco* intervalos define *seis* círculos. La idea se vio realzada mediante la asociación de los cinco sólidos regulares con Platón, cuyo *Timeo* se había acercado más (a juicio de Kepler) que cualquier otra obra a la percepción de los verdaderos Arquetipos matemáticos de creación, un libro que era, «más allá de toda posible duda, un comentario sobre el libro del Génesis, por lo demás el primer libro de Moisés, transformándolo en filosofía pitagórica, como verá fácilmente el lector atento que lo compare con las palabras del propio Moisés».[18] Con esta idea, para él fue un juego de niños calcular las proporciones entre los diámetros de las esferas inscritas y circunscritas para cada sólido, y escoger una disposición adecuada a las órbitas planetarias, sucesivamente mayores, como sucede con notable precisión:[19]

17. *Mysterium Cosmographicum*, 1596; *ibid.*, I, p. 9.

18. *Harmonices Mundi*, *Gesammelte werke*, VI, p. 221. En sus exploraciones de la geometría sólida Kepler descubrió otros dos sólidos geométricos regulares.

19. He vuelto a calcular los números que da el propio Kepler para hacer una serie de proposiciones más coherente.

Planetas	*Sólido*	*Proporciones*	
		Teór.	*Obs.*
Mercurio	Octaedro	86	88
Venus		122	122
Venus	Icosaedro	122	121
Tierra		153	153
Tierra	Dodecaedro	153	145
Marte		192	192
Marte	Tetraedro	192	192
Júpiter		577	577
Júpiter	Cubo	577	635
Saturno		1000	1000

Sólo en el caso del intervalo entre Saturno y Júpiter dejó el sólido de encajar muy bien, pero el buen acuerdo correspondiente a Mercurio y Venus dependía, hay que añadir, de un ajuste especial. Tampoco era eso todo: Kepler examinó también la relación entre períodos de revolución y distancias y comprobó que para cualquier par de planetas adyacentes $D_1/D_2 = \sqrt{(P_1/P_2)}$, aunque en este caso la concordancia con números observados no era tan buena y finalmente encontraría una ley mejor.

Creyendo que la concordancia entre su teoría de los cinco sólidos arquetípicos —teoría que seguiría manteniendo toda su vida— y las distancias medidas podía mejorarse recurriendo a observaciones más exactas que las de Copérnico, Kepler se dirigió a Tycho Brahe, el más exacto y más activo observador que hubo en Europa durante más de mil años, y finalmente empezó a trabajar en calidad de ayudante suyo en Praga (o, mejor dicho, en el castillo de Benatky cerca de la ciudad). Éste fue el punto decisivo de la carrera de Kepler, pues le granjeó el puesto de «matemático imperial» al morir Tycho en 1601. La masa enorme, apenas digerida, de las observaciones efectuadas por Tycho durante treinta años pasó así a manos del hombre más capacitado para aprovecharla.

El papel del astrónomo danés en los primeros tiempos de la astronomía moderna se parece en muchas cosas al de Vesalio en la anatomía. Tal vez incluso superase al anatomista como primer exponente moderno del arte de la observación y la descripción desinteresadas.

Porque si Tycho introdujo en su teoría astronómica factores dominantes cuya naturaleza era física, no puede decirse (como sí se puede acerca de los preconceptos fisiológicos de Vesalio) que las pruebas para refutarlos estuvieran ante sus ojos. El problema de conseguir la precisión no era menos real para él que para Vesalio y los métodos que inventó para resolverlo eran probablemente más originales. Y, desde luego, Tycho fue único entre los primeros científicos modernos por su insistencia en la importancia crucial de la medición cuantitativa exacta; siempre un desiderátum en la astronomía, por supuesto, pero nunca antes abordada con las facultades analíticas e inventivas de Tycho, que primero estudió conscientemente métodos de calcular y corregir los errores de observación con el fin de determinar sus límites de exactitud. Los predecesores más exactos de Tycho no fueron europeos, sino los astrónomos que trabajaban en el observatorio que Ulug Beg fundó en Samarcanda alrededor de 1420. Sus resultados fueron correctos hasta unos diez minutos de arco (es decir, más o menos el doble de buenos que los de Hiparco); las observaciones de Tycho volvían a ser el doble de buenas, cayendo sistemáticamente dentro de un intervalo de cuatro minutos de los valores modernos.[20] Este resultado se consiguió gracias a la paciente atención a los detalles. Los instrumentos que había en Hven eran fijos, de diferentes tipos para las diversas clases de medición angular y mucho más grandes que los que solían utilizarse en el pasado, por lo que sus escalas podían dividirse más sutilmente. Eran obra de los más hábiles artesanos alemanes, a quienes Tycho alentaba con su patronazgo y dirección. Inventó una nueva forma de mira y una especie de escala diagonal para leer fracciones de grado. Al medir la longitud eclíptica de una estrella o su ascensión recta, lo más conveniente es recurrir al procedimiento que requiere un instrumento que mida el tiempo con precisión y Tycho estudió la posibilidad de mejorar los relojes para tal fin: pero comprobó que era más de fiar una técnica suya que permitía remitir las observaciones a la posición del Sol. Fue el primer astrónomo de Europa que utilizó las modernas coordenadas celestes, calculando las posiciones de las estrellas con referencia al ecuador celeste y no (como se hacía antes) a la eclíptica.

20. La proyección hacia atrás de determinaciones modernas indica que las principales estrellas fijas, cuyas posiciones fueron tomadas repetidamente y promediadas, las ubicó Tycho dentro de un intervalo de un minuto aproximadamente de sus valores verdaderos. De hecho, sin ayuda óptica apenas era posible ser más exacto.

Otra innovación suya fue la observación de posiciones planetarias no en unos cuantos puntos aislados del orbe (especialmente cuando estaban en oposición al Sol), sino a intervalos frecuentes, de tal manera que pudiera trazarse todo el orbe.

El propio Tycho calculaba tres fases de creciente refinamiento en sus técnicas de medición; las que hizo antes de cumplir 21 años (1567) las consideraba infantiles y dudosas; las de los años 1567-1574, como juveniles y bastante dignas de confianza; mientras que las que hizo durante los veinte años y pico que pasó en Uraniborg «con el mayor cuidado e instrumentos de mucha precisión a una edad más madura, hasta que cumplí cincuenta años» las llamó «las observaciones de mi edad viril, completamente válidas y absolutamente ciertas». Las técnicas y los niveles de precisión en la astronomía de posición que Tycho instauró de esta manera en la Europa moderna tenían por objeto satisfacer una ambición muy sencilla. En 1563, cuando Tycho tenía 17 años, se produjo una gran conjunción de Saturno y Júpiter que él esperaba ansiosamente. La conjunción vino a demostrar que las *Tablas alfonsíes* (ptolemaicas) estaban equivocadas en un mes entero, mientras que las copernicanas, computadas más recientemente, lo estaban en unos días: «Pues su cómputo no se desvía mucho del verdadero movimiento en el cielo en el caso de estos dos planetas». Esta demostración de insuficiencia persuadió al joven astrónomo a trazar de nuevo el mapa de las posiciones de las estrellas más brillantes (pues incluso los mapas estelares estaban muy equivocados) y, una vez establecida la carta fundamental del cielo, observar detalladamente los movimientos del Sol, la Luna y los planetas para poder calcular sin errores los elementos de sus órbitas y recopilar al mismo tiempo tablas exactas con vistas al futuro. En sus años jóvenes Tycho viajó mucho para perfeccionar sus conocimientos de astronomía y de instrumentos; sus inquietudes intelectuales hicieron de él un ejemplar raro entre la nobleza danesa, tanto es así que el rey Federico II de Dinamarca le concedió la isla de Hven, en el Sund, como lugar de trabajo. En 1576 inició la construcción en la isla del castillo de Uraniborg («Ciudad de los Cielos»), el primer centro de investigación científica de Europa, pues, aparte de sus numerosos instrumentos, Tycho instaló en el castillo un laboratorio alquímico y una prensa de imprimir: recibía estudiantes «constantemente, una clase tras otra, y les enseñaba astronomía y otras ciencias»; ellos, a su vez, trabajaban como ayudantes de su aristocrático maestro:

> Así por la gracia de Dios sucedió que apenas había un día o una noche de tiempo despejado en que no hiciéramos muchas y muy exactas observaciones astronómicas de las estrellas fijas además de todos los planetas y también de los cometas que aparecían durante aquel tiempo, siete de los cuales fueron cuidadosamente observados en el cielo desde aquel lugar. De esta manera se hicieron laboriosamente observaciones durante 21 años.[21]

Hoy en día apenas queda algo de Uraniborg. El final llegó después de la muerte de Federico II: Tycho se peleó con su sucesor, Cristián IV, y se fue de Hven para servir al excéntrico emperador Rodolfo II, patrón de alquimistas y astrólogos, en Praga.

Parece improbable que Tycho iniciase la labor de su vida con una intención marcadamente partidista, aunque es muy posible que quisiera demostrar que a un sistema geostático podía vincularse una exactitud de precisión mayor aún que la de Copérnico. Porque sabemos que al principo Tycho siguió más o menos los pasos del propio Copérnico, aunque en dirección contraria, llegando así al modelo geoheliocéntrico en el que todos los planetas (excepto la Tierra) giran alrededor del Sol, que a su vez da vueltas en torno a la Tierra fija (p. 191). Defender este sistema «tychónico» (descrito brevemente en 1588) como alternativa válida al copernicano fue la última ambición de su vida y encargó a Kepler que la cumpliera; y, de hecho, durante un siglo ocupó esta posición. Sin embargo, Tycho no era esclavo de las ideas convencionales. No creía que la causa de los cambios aparentes en el cielo fueran los meteoros de la atmósfera de la Tierra; probó que los cometas eran cuerpos celestes y que las esferas no podían existir realmente como cuerpos físicos, toda vez que los cometas pasan a través de ellas; y su descripción de los movimientos planetarios es relativamente idéntica a la de Copérnico. Como astrónomo Tycho no pertenecía en modo alguno al pasado: si consideraba a la Tierra incapaz de movimiento, lo hacía como buen filósofo aristotélico de la naturaleza.

El valor de las observaciones de Tycho, incluyendo su catálogo de mil posiciones estelares, no ha sido perdurable. Las primeras observaciones cuyo interés rebasa lo puramente histórico son las

21. H. Raeder, E. Strömgren y B. Strömgren, *Tycho Brahe's description of his instruments and scientific work*, Copenhague, 1946, pp. 106-118 (autobiografía científica de Tycho).

que hizo el astrónomo inglés Flamsteed a principios del siglo XVIII (error aproximado de 10 segundos de arco), pues en los sesenta años más o menos que siguieron a la muerte de Tycho empezó a caer en desuso el instrumento de medición sin ayuda óptica que Hevelio de Danzig seguía defendiendo apasionadamente. Al cabo de un siglo las tablas de Tycho habían sido revisadas concienzudamente por astrónomos como Halley, los Cassinis, Roemer y Flamsteed. Sin embargo, en ese intervalo se habían reconocido los descubrimientos de Kepler basados en la obra de Tycho. Para apreciar la relación entre Kepler y Tycho —el matemático inventivo y el observador paciente— hay que tener presente que se cuenta con un margen muy estrecho para hacer una elección equilibrada entre la astronomía kepleriana y la copernicana. Hasta que no se dispuso de medidas cuya exactitud fuera digna de confianza dentro de un margen de cuatro minutos, o incluso menos, fue innecesario suponer que las órbitas planetarias no fuesen círculos excéntricos al Sol. Kepler, para trazar la órbita de Marte, que le permitió descubrir el carácter elíptico de las órbitas planetarias en general, pudo calcular los elementos de una órbita circular que difería de las observaciones en menos de diez minutos. Si no se dio por satisfecho y siguió adelante, fue sólo porque la labor de Tycho era exacta dentro de un margen de más o menos la mitad del citado. La famosa «Primera Ley» de Kepler fue, pues, el primer ejemplo en la historia de la ciencia de un descubrimiento resultante de la búsqueda de una teoría, no sólo para cubrir con ella determinada serie de observaciones, sino para interpretar un grupo de mediciones refinadas cuya precisión probable era un factor significativo. La distinción entre mediciones un tanto improvisadas y mediciones científicas, las cuales llevan aparejadas la crítica del resultado cuantitativo y la determinación del margen de error, evolucionó lentamente en otras ciencias durante la revolución científica.

Aunque los descubrimientos de Kepler no hubieran sido posibles sin el perfeccionamiento de la observación conseguido por Tycho Brahe, entrañaban algo más que la precisión matemática. Antes de inventarse el telescopio los únicos materiales disponibles para construir una teoría planetaria eran mediciones angulares —principalmente la determinación de las posiciones de los planetas en el zodíaco cuando el Sol, la Tierra y el planeta en cuestión estaban en la misma línea recta. Así, pues, lo máximo que podía hacer una teoría planetaria era predecir a qué horas volvería un planeta a la misma situa-

ción relativa y cuál era su posición en tales momentos. El análisis matemático del sistema solar como cierto número de cuerpos moviéndose en el espacio tridimensional nunca lo habían intentado, como tal, los astrónomos antiguos, que se daban por satisfechos asignando tales problemas a los filósofos. Nunca les había interesado la verdadera trayectoria de un planeta en el espacio siempre y cuando su modelo predijera con exactitud tolerable las escasas situaciones recurrentes en las que sería fácil hacer observaciones. La tendencia general de la revolución científica fue a rebelarse contra este concepto del astrónomo como matemático, creador de modelos para salvar los fenómenos, y a ver la astronomía como una ciencia que abarcaba cuanto se sabía de los cielos y de las relaciones de la Tierra con las regiones celestes. Copérnico había abolido el ecuante porque era una ficción matemática, un recurso no filosófico. Galileo modificó el universo de Copérnico para que fuera aún más explicable físicamente. Kepler tenía un concepto verdadero del universo como un sistema de cuerpos cuya disposición y cuyos movimientos debían revelar los principios de un proyecto común —o, utilizando un lenguaje más moderno, ser capaces de rendir generalizaciones universales— los cuales debían demostrarse partiendo de observaciones y no de axiomas físicos o metafísicos. A juicio de Kepler, la tarea del astrónomo no consistía en estudiar el universo por partes —construir un modelo independiente para cada planeta—, sino estudiar e interpretar el conjunto para demostrar que los fenómenos de cada parte concordaban con un proyecto único. Su objetivo era proporcionar una pauta filosófica que se ajustase a los nuevos descubrimientos de la astronomía matemática: «para que yo pudiese atribuir el movimiento del Sol a la Tierra misma mediante un razonamiento físico, o más bien metafísico, como Copérnico hizo mediante uno matemático», comentó en el prefacio de *Mysterium cosmographicum*. La ciencia exacta podía correctamente hacer incursiones en la prerrogativa establecida de la filosofía; Kepler no quería ni mucho menos excluir por completo las consideraciones naturo-filosóficas de la ciencia cuantitativa.

Sin embargo, como ayudante a sueldo de Tycho, Kepler no gozaba de libertad sencillamente para probar que Copérnico tenía razón: al principio se le encomendó que perfeccionara la teoría del movimiento de Marte calculado por Longomontano, el otro ayudante de Tycho, de acuerdo con las observaciones de éste. El resultado se publicaría en 1609 (aunque la labor se realizó cuatro años antes) bajo el título de

Astronomía nueva, por causas, o física celeste, tratado en los comentarios sobre los movimientos de Marte a partir de las observaciones de Tycho Brahe, ocho años después de que la muerte de Tycho dejara a Kepler en libertad de defender el sistema que eligiera. Lo primero que descubrió fue que el plano de la órbita de Marte pasaba a través del Sol —no a través del centro de la órbita de la Tierra, como suponía Copérnico— y que su ángulo de inclinación con la eclíptica era invariable. También probó a abandonar los pequeños epiciclos de Copérnico y en su lugar reintroducir el punto ecuante (p. 107), pero, aunque esto permitía ajustar la velocidad angular de Marte con respecto al Sol, Kepler comprobó que ninguna posición del punto ecuante satisfaría todas las observaciones. Volviendo al movimiento de la Tierra (o del Sol) —puesto que cualquier error de exposición se reflejaría en todos los planetas—, Kepler descubrió algo importante: que se parecía a los planetas porque requería un punto ecuante para una representación exacta. El caso de Marte siguió siendo insoluble: Kepler pudo representar con gran precisión el movimiento orbital «en longitud» por medio de un ecuante corredizo, pero los consiguientes errores «en latitud» (esto es, las supuestas distancias entre el planeta y la eclíptica) eran intolerables. Al volver a la excentricidad bisecada ptolemaica, encontró errores máximos de unos ocho minutos de arco: sobre éstos escribió:[22] «La divina providencia nos concedió un observador tan cuidadoso en Tycho Brahe que sus observaciones declararon a este cálculo ptolemaico culpable de un error de 8 minutos; ... como no era posible pasar por alto estos 8 minutos, ellos solos han conducido a una reforma total de la astronomía». Parecía casi imposible hacer progresos por medio de estas hipótesis arbitrarias o «delegadas», como las llamó Kepler, que en verdad se hallaba lejos de su objetivo; pero también se guiaba por principios diferentes, «físicos», cuya raíz era su creencia de que un «espíritu móvil» en el Sol era el causante de las revoluciones de los planetas en una especie de vórtice de fuerza. Suponiendo que esta fuerza estuviera confinada al plano eclíptico y actuara en círculo, por así decirlo, su vigor a cualquier distancia del Sol sería inversamente proporcional a esa distancia, de lo cual Kepler creyó deducir el resultado (que más adelante comprobó que era falso en general, aunque es cierto en el caso de las regiones próximas a los ápsides de la órbita) de que la velocidad del planeta

22. *Astronomia Nova* (1609), cap. 19; *Gesammelte Werke*, III, p. 177.

también es inversamente proporcional a su distancia del Sol. Como por la observación conocemos las velocidades del movimiento en distintos puntos de la órbita, esta relación aportaba otra manera de calcular las distancias. Sin embargo, en la práctica no conviene obtener las velocidades instantáneas de los diversos radios y, por consiguiente, Kepler modificó la regla dejándola en la proposición —conocida desde entonces por «Segunda Ley de Kepler del movimiento planetario»— de que el radio vector trazado desde el Sol hasta un planeta barre áreas iguales de la órbita en tiempos iguales. Aunque la primera prueba de la ley era discutible, más adelante Kepler se cercioraría de que los diversos errores que había en ella se anulasen mutuamente, de tal forma que la ley fuera rigurosamente cierta.[23] La enunció definitivamente en su *Epítome de la astronomía copernicana* (1621).

En esta fase de sus complejos y tediosos cálculos —que llevaban aparejados el análisis geométrico de muchas posibilidades teóricas y el cotejo continuo de los movimientos previstos con observaciones escogidas entre las muchas que hizo Tycho Brahe— Kepler ya estaba convencido de que la órbita de la Tierra o de un planeta no podía ser un círculo perfecto excéntrico al Sol. Como dijo:

> El lector reflexivo e inteligente verá que esta opinión entre los astrónomos concerniente al círculo excéntrico perfecto de la órbita supone muchas cosas que son increíbles en la especulación física ... Mi primer error fue tomar la trayectoria del planeta como un círculo perfecto, y este error me robó más tiempo, ya que fue enseñado basándose en la autoridad de todos los filósofos, y concordaba por sí mismo con la Metafísica.

En los cálculos de la velocidad angular de la Tierra Kepler podía suponer que la órbita era circular, ya que su carácter elíptico es pequeño (*nam insensibile est ... quantum ei ovalis forma detrahit*), pero en las órbitas de los demás planetas la diferencia sería muy sensible. El siguiente problema, como es obvio, fue definir con más exactitud la naturaleza de esta órbita no circular. Así, pues, reanudó las investigaciones de Marte, esta vez con mucha más seguridad porque había calculado el movimiento de la plataforma del observador —la Tierra— con mayor exactitud que antes. Los experimentos revelaron

23. *Ibid.*, III, pp. 263-270.

que, de hecho, la órbita de Marte no podía ser circular, pues, al compararla con las observaciones, hacía que el movimiento del planeta fuera demasiado rápido en el afelio y en el perihelio y demasiado lento en las distancias medias. Después de muchas pruebas, Kepler escribió: «Queda, pues, claro, que la órbita del planeta no es un círculo, sino que pasa por dentro del círculo en los lados e incrementa su amplitud otra vez hasta la del círculo en el perigeo. A la forma de una trayectoria de esta clase se la llama óvalo». Por otra parte, la evolución de los pensamientos de Kepler acusó la influencia de su idea del mecanismo físico capaz de producir semejante desviación de la forma perfectamente circular. Supuso que la trayectoria ovalada la trazaba la resultante de dos movimientos distintos; el primero de ellos se debía a la acción de la virtud del Sol y variaba con la distancia del planeta; el segundo era una rotación uniforme del planeta en un epiciclo imaginario producido por su propia *virtus motrix*. La órbita hipotética sería un óvalo (o, mejor dicho, un ovoide, toda vez que sus ápsides serían desemejantes) encerrado dentro de la excéntrica normal en todos los puntos salvo en los ápsides. Es extraordinario que después de abandonar del todo el concepto de las esferas sólidas y los epiciclos, y de haberse convencido de lo absurdo de su propio término físico de la hipótesis delegada,[24] Kepler volviera ahora, en 1604, a la vieja idea de componer la verdadera trayectoria del planeta partiendo de movimientos circulares. Trabajó mucho en vanos intentos de geometrizar esta extraña hipótesis de modo que pudiera compararse con la observación; incluso utilizó una elipse —su excentricidad demasiado grande— como aproximación al ovoide. Pese a ello, al final no pudo hacer ningún ajuste exacto: Kepler tuvo que confesar que la órbita ovalada y la teoría de que su causa era física se habían «desvanecido en humo».[25] Tras muchos más esfuerzos tediosos, por fin encontraría la explicación gracias a un feliz accidente, como él mismo escribió; percibió una congruencia numérica entre el exceso del círculo excéntrico sobre la órbita verdadera en las distancias medias y el exceso de la secante de la ecuación óptica en la

24. La «hipótesis delegada» (círculo excéntrico con ecuante colocado arbitrariamente) funciona bien en el caso de la Tierra porque su órbita es casi circular ($e = 0,017$), pero en el caso de Marte, cuya excentricidad es unas cinco veces mayor, el error será más evidente.

25. *Gesammelte werke*, III, p. 345: «causas physicae in fumos abeunt». A. Koyré, *La révolution astronomique*, Hermann, París, 1961, pp. 250-253.

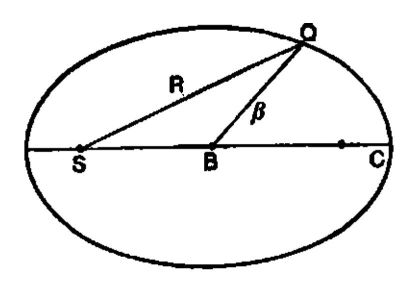


FIGURA 5.2

La elipse

R es el radio vector; *e*, la excentricidad (SB/BC); β, la anomalía excéntrica.

misma región sobre el radio: o (en términos modernos) percibió que la longitud del radio vector del planeta podía escribirse con la fórmula R(1 + *e* cosβ); *esta es una forma de la ecuación para una elipse verdadera.*[26] La elipse que obtuvo así tenía el Sol en un foco y encajaba exactamente en la ley de superficie y las observaciones. Durante algún tiempo Kepler estuvo muy preocupado porque no acertaba a dar un significado físico a la órbita elíptica: «para demostrar que la máquina celeste no es tanto un organismo divino como una pieza de relojería, con toda la variedad de movimientos que se llevan a cabo por medio de una fuerza magnética muy sencilla en el cuerpo, del mismo modo que en un reloj todos los movimientos proceden de una sencilla pesa». Kepler «estuvo a punto de volverse loco al considerar y calcular esta cuestión» hasta que pensó que un sencillo movimiento de vaivén (vibración) del planeta en una línea recta y corta, al mismo tiempo que describía un círculo alrededor del Sol, generaría la elipse.

Las dos primeras leyes de Kepler —la primera definía la órbita elíptica— acabaron con la vieja astronomía matemática, aunque el hecho no sería aceptado del todo hasta después de dos generaciones. La física de Kepler y las observaciones de Tycho se habían unido en una definición nueva y elegante del movimiento orbital planetario.

26. *G. W. III*, p. 345b; Koyré, pp. 254-256. *R* es el radio del círculo excéntrico, *e* la excentricidad, β el ángulo de rotación del vector radio. La diferencia era de un exceso de 429 partes sobre 100.000.

Pero a Kepler aún le faltaba un poco para alcanzar su objetivo: descubrir la «armonía del mundo», tema que (según había dicho a un correspondiente en 1601) «llevo meditando mucho tiempo y que sólo podría completar si Tycho reconstruyera la Astronomía o si yo pudiese usar sus observaciones».[27] Una vez cumplida esta última ambición, Kepler saldaría su deuda con Tycho por medio de las *Tablas rudolfinas* (1627) —que durante casi un siglo marcaron la pauta de la exactitud de las predicciones—; mientras tanto, después de preparar este trabajo pero mucho antes de su publicación, Kepler volvió a su inquietud original en la *Armonía del mundo* (*Harmonices mundi*, 1619). El pensamiento del Creador (que Ptolomeo había pasado por alto) y del Arquetipo del mundo «que reside en la geometría y expresamente en la obra de Euclides, aquel filósofo tres veces el más grande» nunca había abandonado su mente.[28] Revisó su modelo Arquetípico regular-poliédrico en este libro (y volvería a hacerlo en su *Epítome de astronomía copernicana*, 1621) e ideó también una base lógica para la escala musical «justa», aceptada recientemente entre músicos, que igualmente dependía de la geometría de los polígonos. Se le presentó una nueva unificación: al formar proporciones entre las velocidades extremas de los planetas (en el perihelio y el afelio) comprobó que reaparecían las consonancias musicales, la verdadera (aunque siempre inaudible para el hombre) música de las esferas; así se explicaron las magnitudes de las excentricidades de las órbitas y se comprendió el medio empleado por Dios para ajustar exactamente el modelo poliédrico. No es extraño que Kepler pudiera comparar el canto polifónico con los coros de ángeles. Finalmente, cuando faltaban doce días para que terminara de escribir *Harmonices mundi*, Kepler, al considerar las facultades de ciertas proporciones, descubrió la tercera ley que lleva su nombre: la proporción entre el cuadrado del período de un planeta (T) y el cubo del radio (R) es constante dentro del sistema solar ($T^2/R^3 = K$). Kepler no probó esta tercera ley por medio de datos exactos ni le dio una base lógica. Pero le agradó como eslabón definitivo entre velocidad y distancia y en el *Epítome* ajustó las «masas» de cada planeta de tal manera que el espíritu solar (o «especie») diera el «empuje» adecuado a la distancia idónea (supuso que si el «empuje» se tomaba como constante, la velo-

27. Carta a Magini, 1 de junio de 1601.
28. Carta a Heydon, octubre de 1605, *G. W.*, XV, p. 235.

cidad por él conferida sería inversamente proporcional a la «masa»).

No hace falta recalcar la sencillez y la claridad que estas relaciones introdujeron en la astronomía. Las formas y dimensiones de las órbitas planetarias, así como las velocidades de los movimientos de los planetas, podían ahora, en principio, calcularse con certeza, si no con facilidad, pues no existe ninguna solución sencilla del problema que plantea la segunda ley de Kepler, el de dividir la superficie de una elipse en fracciones determinadas por medio de radios vectores procedentes de un foco. Así, pues, durante el medio siglo siguiente los astrónomos idearon otros métodos de definir la velocidad orbital de los planetas relacionándola con el foco *vacío* de la elipse (alrededor de la cual, como Ptolomeo había descubierto sin saberlo, la revolución se acerca más a la uniformidad que alrededor del Sol). La difusión de los descubrimientos de Kepler es en sí misma un tema intrincado: publicados lejos de los principales centros de actividad intelectual de Italia y Francia, redactados a veces de una manera difusa y torpe (cuya «autobiografía» es tal vez más interesante para nosotros que para los contemporáneos), conteniendo ideas esotéricas que hombres más jóvenes considerarían tan inaceptables como las consideraba Galileo, los libros de Kepler no podían comprenderlos quienes no supieran matemáticas. Como el propio Kepler reconoció:[29]

> Hoy en día es dificilísimo escribir libros matemáticos, especialmente astronómicos. Pues a menos que se haga uso de una precisión exacta en las proporciones, explicaciones, demostraciones y conclusiones, el libro no será matemático; si tal uso se hace, entonces su lectura resulta muy difícil, sobre todo en latín, que carece de artículos y de la gracia del griego... Por esto hoy en día hay pocos lectores idóneos; la mayoría generalmente desprecia y rechaza estas obras. ¿Cuántos matemáticos hay que estén dispuestos a emprender la tarea de leer todas las *Cónicas* de Apolonio de Perga? Sin embargo, su material es de un tipo que se presta mucho más que la astronomía a la explicación por medio de cifras y líneas. Yo mismo, que paso por matemático, canso mi cerebro al leer mi propia obra...

Las *Tablas rudolfinas* fueron aceptadas relativamente pronto en los círculos competentes, ya que se las consideró superiores a sus predece-

29. *Astronomia Nova*, Prefacio; trad. de A. R. H. partiendo de Marie Boas Hall, ed., *Nature and nature's laws*, Macmillan, Londres, 1970, p. 67, *G. W.*, III, p. 18.

soras y a sus rivales contemporáneas; la difusión de las leyes de Kepler, en cambio, dependió en gran medida de los resúmenes de su astronomía que se publicaban en obras de instrucción general tales como *Curso de matemáticas* (*Cursus mathematicus*, 1644), de Pierre Hérigone, o *Astronomía carolina* (1661) —en inglés—, de Thomas Streete, donde Newton aprendió todo lo que sabía de Kepler. Los grandes sistemas de la filosofía natural de mediados de siglo, los de Descartes y Gassendi, no tomaron nada de Kepler, por lo que la comprensión de las ideas keplerianas quedó a merced de intérpretes secundarios que aceptaban fácilmente la órbita elíptica pero rechazaban la segunda ley al mismo tiempo que (en gran parte) no hacían caso a la tercera, a la que sólo pudo dar trascendencia la lenta evolución de la dinámica.

Con Kepler llegó a su fin una tradición de astronomía matemática que (en la tradición occidental) había empezado con los babilonios. No se trataba solamente de que se hubiera destruido la primacía del círculo, sino también que, una vez Kepler lo hubo resuelto, el problema del movimiento planetario que había fascinado tanto a eruditos como a analfabetos durante miles de años perdió interés, salvo para los expertos. La causa fue en parte que la atención se desvió hacia problemas de astronomía física, con el uso del telescopio, y en parte al ocaso de la astrología. (Los almanaqueros londinenses, por supuesto, prolongarían la tradición babilónica que Kepler había expulsado bruscamente de la ciencia seria.) Sin embargo, Kepler no era enemigo de la astrología; y también Galileo sacaba horóscopos. Como creía firmemente en la integridad del universo y en la centralidad del Sol, rechazando toda idea de un espacio infinito con una distribución uniforme de las estrellas, también Kepler daba por sentado que los cielos ejercían alguna influencia sobre la Tierra. No hay duda de que el Sol y la Luna afectan a nuestro planeta, entonces, ¿por qué no pueden hacer lo propio las estrellas y los otros planetas? En general, al mismo tiempo que adoptaba este punto de vista racional (que no puede refutarse, ya que no tenemos idea de cómo sería la experiencia terrestre sin estrellas ni planetas), Kepler desconfiaba del bagaje habitual de los astrólogos. «Yo soy un astrólogo luterano —le dijo a Maestlin— tiro las tonterías y me guardo lo esencial.» Incluso en esto era contrario al espíritu de la época venidera.

Pero Kepler era más que un matemático. Quizá la importancia de su labor, aparte de las tres famosas leyes, no se haya estimado sufi-

cientemente. Los historiadores antiguos pasaban cortésmente por alto las teorías de Kepler sobre los mecanismos físicos, su amor por la analogía y todo cuanto estuviera subordinado al argumento matemático principal, pues lo consideraban escoria que era mejor dejar enterrada. Ahora no es difícil ver que Kepler era tan original y estimulante en las cuestiones secundarias como al seguir la vía matemática clara. Ciertamente, sus ideas sobre la gravedad, sobre la acción de las fuerzas a distancia, constituyen factores importantes en la prehistoria de la teoría de la gravitación universal. Los cartesianos se burlaban de las fuerzas misteriosas que Kepler situaba en el Sol, y de sus apetencias de materia, del mismo modo que más adelante se opondrían a la idea de la atracción gravitacional. Es verdad que Kepler traza extrañas equivalencias entre el «alma» o «espíritu» y la fuerza, pero creó su teoría cosmológica y su astronomía de modo que siguieran firmes principios de causalidad física y apartaran también un modelo mucho más exacto que el de Galileo o el de Descartes. Fue Kepler quien, en el *Mysterium cosmographicum*, siguió el ejemplo de Tycho Brahe y denunció la creencia tradicional en las esferas materiales, creencia a la que Copérnico no se había opuesto.

> Tampoco, a decir verdad, hay que temer que las orbes lunares sean desplazadas por la fuerza, comprimidas por las estrechas proporciones de (otros) cuerpos (celestes), si no se incluyen y entierran en esa orbe misma. Porque es absurdo y monstruoso situar estos cuerpos en el cielo, dotados de ciertas propiedades de la materia, los cuales no resisten el paso de ningún otro cuerpo sólido. Ciertamente, muchos no temerán dudar que haya en general algunas de estas orbes Adamantinas en el cielo, que las estrellas sean transportadas por el espacio y el aire etéreo, libre de estos grilletes de las orbes, gracias a cierta virtud divina que regula su rumbo mediante la comprensión de las proporciones geométricas.

Preguntó a continuación cuáles son las cadenas y el arnés que sujetan la Tierra móvil a su orbe, y señaló que en ninguna parte de la superficie del globo la encuentran los hombres empotrada en un medio material, sino rodeada siempre de aire. También a Kepler, cuando menos tanto como a Descartes, hay que concederle el mérito de haber percibido que en el sistema solar tenía que haber alguna fuente de fuerza o tensión. No podía consistir en un complejo formado por cuerpos totalmente independientes, sin interacción mutua. No podía

ser coincidencia que los planos de todas las órbitas pasasen a través del Sol, ni podían explicarse las variaciones del movimiento de un planeta —las diferencias de su velocidad en el perihelio y el afelio, por ejemplo— sin suponer que alguna fuerza estaba actuando sobre él. Para Galileo los movimientos naturales del universo eran básicamente sencillos, eternos y libres de fuerza; en la visión de Kepler, mucho más realista, estos movimientos eran complejos y resultantes de una interacción de «fuerzas corporales» que por analogía (más que por identificación) él denominaba magnéticas o gravitacionales. En este sentido Galileo aún pertenecía a un universo geométrico que Kepler había rechazado en aras de un universo físico sin lugar para las ideas puramente geométricas desprovistas de equivalentes físicos. Escribió que califica sus hipótesis de físicas porque probaba «que la irregularidad del movimiento (de los planetas) corresponde a la naturaleza de la esfera planetaria, esto es, es física».[30]

Así fue cómo Kepler indicó directamente a los hombres (cuando éstos empezaron a entenderle) el camino de la mecánica celeste, aunque recorrerlo exigiría una revisión y una clasificación profundas del concepto de fuerza, así como ideas nuevas acerca de la naturaleza y la actividad física de la materia universal. Kepler demostró, si bien de manera idiosincrásica, que las matemáticas, la medición y los principios físicos podían unirse en cierta síntesis, pese a dejar la demostración incompleta. Los filósofos de la naturaleza no podían pasar por alto indefinidamente la invitación a cultivar *a*) la demostración matemática y *b*) la exactitud de la observación a la manera kepleriana. Kepler rebasó ampliamente los límites del problema astronómico de dos generaciones —¿se mueve o no se mueve la Tierra?— para defender principios de movimiento celeste, enmarcados en un modelo de teorías relativas a la física cósmica, las cuales desplazarían por completo las ideas tradicionales sobre lo que debían ser la filosofía o la astronomía.

30. Gerald Holton, «Johannes Kepler's universe: its physics and metaphysics» (1956), reeditado en *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1973, pp. 69-90. Arthur Koestler, *The sleepwalkers*, Hutchinson, Londres, 1959, contiene una amable descripción de la complejidad de la vida y el pensamiento de Kepler.

Capítulo 6

INNOVACIONES BIOLÓGICAS

Para Alexandre Koyré, el influyente historiador francés de la ciencia que murió en 1964, el centro del escenario de la revolución científica lo ocupaban las ciencias físicas y el drama que representó giraba en torno a la matematización de las mismas. A la mayoría de los actuales historiadores de la ciencia este punto de vista les parecería muy estrecho. Abogarían por la importancia de la filosofía mecanicista (capítulo 7), apartándose bastante de la tendencia matemática, así como por grandes cambios de ideas y métodos totalmente independientes de la ciencia física y por cambios de las actitudes sociales ante la ciencia, alegando que todo esto son aspectos de una situación revolucionaria que el historiador no puede pasar por alto. De hecho, Koyré no hablaba en contra de semejante visión completa de la revolución científica; más bien abogaba por la importancia especial de las corrientes que condujeron hasta Newton y, por ende, de modo relativamente directo, hasta Maxwell, Planck y Einstein. Sin duda Einstein era consciente de su descendencia intelectual directa de Galileo, conciencia que, evidentemente, no compartían (pongamos por caso) Crick y Watson en relación con Harvey. El diálogo sobre cuestiones de espacio y tiempo entre el siglo XVII y finales del XX es posible y, de hecho, casi cabría decir que normal; pero un diálogo parecido sobre la vida y los procesos vitales parece virtualmente impensable. Las condiciones del actual debate en torno a la vida no se establecieron hasta el siglo XIX.

Estos pensamientos conducen a otros. ¿Hablaría el historiador, tal vez apropiadamente, de una «revolución negativa» en la biología del siglo XVII, por ejemplo, una revolución que ciertamente destruyó

la antigua base de confianza sin crear un eficaz «programa de investigación» que permitiera un rápido desarrollo cumulativo? Uno piensa en la esterilidad relativa de la microscopia y en el intervalo, aún más sorprendente, entre el descubrimiento por Harvey de la función verdadera del corazón y el inicio de la investigación médica de las imperfecciones del funcionamiento cardíaco —empleando los medios más sencillos— dos siglos después. La época de Newton nos proporciona abundantes testimonios de que las ideas y los conocimientos relativos al cuerpo humano parecían entonces no menos avanzados, en lo que se refiere a los de la antigüedad, que sus análogos de la ciencia física, y si el progreso hay que medirlo por la intensidad del interés, no cabe la menor duda de que en la medicina y la historia natural se hacían más esfuerzos innovadores que en otras disciplinas. Así, pues, no podemos poner en tela de juicio la existencia de una situación «revolucionaria»; sin embargo, por diversas razones —entre las que se cuentan la dificultad intrínseca de los fenómenos y el hecho de no tener la coherencia intelectual de que disfrutaban las ciencias matemáticas— los resultados fueron mucho menos afortunados. Al sondear las profundidades de la vida, no se llegó tan hondo como al explorar las del espacio y el tiempo.

¿Debería el historiador sacar la concusión de que las ciencias matemáticas (newtonianas) sirvieron de modelo a otras? A decir verdad, como después veremos con mayor detalle, a principios del siglo XVIII se creía que Newton brindaba ideales de conocimiento y de método; no es que estos ideales se vieran exclusivamente en términos matemáticos, sin embargo, ya que el método newtoniano que se proponía para la química o la biología era completamente experimental y cualitativo. Sin embargo, parece ser que unos cien años antes, con Descartes, el mecanicismo científico tal como se aplicaba a los organismos vivos evolucionó al mismo ritmo que la mecanización del universo, y, si bien el mecanicismo biológico (Descartes, Borelli, Willis) se basaba por fuerza en análogos físicos, difícilmente podría decirse que dependiera de la evolución anterior de la ciencia física. Más bien se trataba de paralelismo e interacción. Los primeros intentos de emplear la física como modelo de la investigación biológica solían llevar a un callejón sin salida. Así ocurrió, como es sabido, cuando Santorio (1561-1636) investigó los cambios del peso del cuerpo producidos por la ingestión y la excreción: su técnica de la silla de pesar, ingeniosa y aplicada cuidadosamente, condujo al interesante

descubrimiento de que el cuerpo pierde ininterrumpidamente gran cantidad de líquido por medio de la transpiración invisible, pero no es posible argüir que el experimento contribuyó al avance del conocimiento de los procesos metabólicos, ni siquiera que ofreció datos contrarios a las tradicionales ideas sobre la digestión y la asimilación. En este contexto, la elucidación del sistema linfático por Gaspar Aselli (1622), Juan Pecquet (1651) y otros anatomistas, utilizando el acostumbrado método consistente en abrir animales muertos y vivos, fue mucho más fructífera. De modo parecido, en lo que se refiere a la teoría, las explicaciones físicas de la acción muscular que invocaban reacciones químicas entre las dos sustancias, tales como la «explosión» o la neutralización ácido-álcali eran totalmente *a priori* y, aunque sugestivas, a la larga carecían de utilidad. Allí donde (como en estos ejemplos) la integridad independiente del pensamiento biológico se veía comprometida, en el mejor de los casos el único resultado posible era una especie de andamiaje. A pesar de los resultados interesantes obtenidos mediante el experimento y la explotación de analogías físico-científicas en el siglo XVII, el estudio de la anatomía seguiría tal como había estado desde tiempos de Galeno, la base principal y más segura para ideas de la función fisiológica, hasta principios del siglo XIX.

Desde hace tiempo los historiadores utilizan un esquema cronológico que presenta a Lavoisier (*c.* 1787) como el «Newton» de la química y a Darwin (1859) como el «Newton» de la biología.[1] Recientemente Thomas Kuhn ha señalado que incluso en la ciencia física del siglo XVII la integridad de la revolución de la ciencia matemática se halla al lado de un grado incompleto de progreso en las ramas experimentales, donde, por otra parte, la matematización fue «aplazada» hasta el siglo XIX. Kuhn se muestra de acuerdo con Koyré en que «si consideramos que la revolución científica fue una revolución de ideas, son los cambios habidos en estos campos tradicionales, casi matemáticos, lo que hemos de procurar entender». Al mismo tiempo, sin embargo, cree que «otras cosas de vital importancia les ocurrieron también a las ciencias durante los siglos XVI y XVII (la revolución científica no fue simplemente una revolución del pensa-

1. Tal vez la importancia que se da a Darwin sea injusta para con los citólogos, fisiólogos y neurólogos que trabajan en su época con resultados enormemente productivos; sin embargo, a Darwin se debe la idea biológica más universal de todos los tiempos.

miento)», y finalmente llega a la conclusión de que es imposible una simetría histórica completa siquiera entre los departamentos matemático y experimental de la física, toda vez que «la división entre ciencia matemática y experimental» parece «arraigada en la naturaleza de la mente humana».[2] No es de extrañar, pues, que existan asimetrías históricas aún mayores entre las ciencias matemática y química, geológica y biológica, donde los rasgos «baconianos» de la evolución son aún más marcados que en la física experimental.

De hecho, mientras que los más grandes teóricos físicos, como Huygens y Newton, se esforzaron con éxito por extender el dominio de la ciencia matemática a ramas experimentales como la óptica, la neumática y la acústica, aumentando con ello la homogeneidad, en las ciencias biológicas la especulación ascendió más que nunca a partir de las sencillas colecciones de historia natural. La especulación llegó hasta pensar en la posibilidad de que hubiera animales en la Luna o los planetas, efectuar descabelladas interpretaciones geológicas del Libro del Génesis y (más extensamente) reinterpretar la fisiología y la medicina en términos de mecanismos fantásticos. La historia natural descriptiva amplió su carácter desde los microscópicos animales de las charcas hasta la anatomía comparada de los mamíferos más grandes, abarcando una enorme y amorfa masa de publicaciones sobre curiosidades geológicas, monstruosidades animales, singularidades meteorológicas y descripciones regionales. Estas publicaciones, a menudo sensacionalistas, han dado al adjetivo «baconiano» un matiz peyorativo que es impropio del coleccionismo botánico, de la microscopia y de la anatomía comparada que no siguieron menos pautas acumulativas de una manera organizada y crítica. A todas estas ciencias, así como (por ejemplo) a la mineralogía y la neumática, se las podría calificar de «baconianas» en el buen sentido del término, puesto que son descriptivas, enumerativas y ateóricas.

Las bases históricas de las ciencias de la naturaleza viva —aparte de los escritos y ejemplos didácticos del propio Bacon, como en el *Sylva sylvarum* (1627), que influyó mucho, especialmente en los británicos— eran dobles: la anatomía humana y la historia natural enciclopédica del Renacimiento. El renacer de la anatomía ya lo hemos comentado; era lógico, aunque en modo alguno inevitable, que exten-

2. T. S. Kuhn, *The essential tension*, University of Chicago Press, Chicago, 1977, pp. 41, 64 (publicado por primera vez en 1972).

diera sus actividades e incluyese el estudio más minucioso de los animales, sobre todo de aquellos que son como el hombre o que tienen un interés especial para él, tales como el caballo (en la *Anatomia dei cavallo*, 1598, de Carlo Ruini) o el perro (cuya evolución embriológica describió Fabrizi d'Acquapendente). Con Pierre Belon (1517-1564) y Guillermo Rondelet (1507-1566) el tratamiento monográfico se hizo extensivo a los peces, mientras que el primer libro especializado sobre los insectos fue obra de un grupo de ingleses (*Theatrum insectorum*, 1634, publicado por Thomas Mouffet).[3] La coherencia dignifica semejantes estudios hasta la famosa monografía sobre el chimpancé que escribió Edward Tyson (1699), coherencia que en parte procede de las técnicas de disección y análisis del anatomista profesional y en parte del paralelo con el modelo humano, ápice de la escala morfológica. Los naturalistas enciclopédicos hicieron menos progresos hacia un método científico «moderno». Las ideas del naturalista sobre el origen de la vida orgánica, la distribución de plantas y animales, y el motivo de su gran variedad de estructuras y formas seguían siendo en su mayor parte de origen no científico o, en el mejor de los casos, procedían de fuentes muy antiguas. En cambio, iba acercándose progresivamente a formas modernas de clasificar y describir organismos y de definir la materia que trata la historia natural. Cada vez le interesaba menos el estudio de la naturaleza como tarea moral; hacía una distinción parcial entre la *Flora* y la *Pharmacopoeia*. Sin embargo, existía el inconveniente de que a medida que aumentó la eficiencia clasificadora y descriptiva de los botánicos y geólogos, fue disminuyendo su interés por los demás problemas del mundo orgánico. En general, el naturalista se veía limitado a una clase determinada de actividad —fruto, en esencia, de la necesidad de los boticarios de distinguir las hierbas medicinales—, en parte, desde luego, porque era una tarea que valía la pena hacer y estaba dentro de su competencia; pero en parte también era debido a que carecía de imaginación y ésta le habría liberado de la influencia de la tradición, que seguía siendo muy literaria. Las obras de autores como Conrad Gesner (1516-1565) y P. A. Mattioli (1500-1577) tienen tanto de recopilaciones eruditas como de trabajos de observación. Un

3. Mouffet (o, mejor dicho, su hija) es el único «científico» (si exceptuamos al doctor Foster) inmortalizado en canciones infantiles inglesas. Su libro fue en gran parte obra de Thomas Penny (1530-1588) y Edward Wotton (1492-1555).

tipo distinto de biología —por ejemplo, los sencillos experimentos con los que Francesco Redi, un siglo después, refutó la creencia universal en la generación espontánea de los insectos— ciertamente habría sido posible, pero el contexto intelectual que le habría permitido florecer no existía aún en tiempos de los autores citados. En relación con la vida, los escritos de Aristóteles seguían siendo fuente de estímulo mucho más que de dudas, y no parecía necesario tratar de definir nuevas cuestiones o buscar nuevos medios de obtener respuestas.

Así, pues, la vasta gama de investigaciones biológicas y médicas que se iniciarían durante el siglo XIX tuvo como únicos representantes profesionales en el Renacimiento a la medicina y a la historia natural erudita (esta última, huelga decirlo, muy relacionada con la medicina). Por lo tanto, es natural que los médicos desempeñaran un importante papel creativo en la biología (seguimos usando este término anacrónico pero indispensable) de los siglos XVI y XVII, y que sus intereses influyeran en la marcha de los acontecimientos. Lo notable son el alcance y la diversidad del esfuerzo intelectual dentro de la profesión de la medicina. Muchos médicos, por supuesto, trataban de aportar algo y de distinguirse mediante publicaciones relativas al ejercicio propiamente dicho de la medicina o a las ciencias médicas (anatomía, farmacología, etcétera), pero otros muchos se dedicaban al estudio de animales y plantas, cuya relación con la medicina era más marginal. La mayoría de los grandes botánicos eran médicos: Fuchs, Cesalpino, Bauhin, Morison y Tournefort, por citar sólo algunos. Toda la labor de anatomía comparada y gran parte de la de microscopia la llevaron a cabo médicos. Nombres tan notables como los de Otto Brunfels (1489-1534), John Ray (1627-1705), Robert Hooke (1635-1703) y Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723), es decir, de hombres que no eran médicos pero que contribuyeron al conocimiento de las cosas vivas, son muy escasos. La organización del movimiento científico y la estructura de las universidades perpetuaron la relación mutua entre la medicina y la biología hasta mucho después de separarse las inquietudes «médicas» de las «científicas», debido sencillamente a la fosilización de la enseñanza oficial de cualquiera de las ciencias de la vida ajenas al plan de estudios médicos. Los maestros de botánica (o, para el caso, de química) eran nombrados únicamente para satisfacer las necesidades de la facultad de medicina.

Al médico joven y ambicioso de finales del siglo XVI y del siglo XVII, que ansiaba distinguirse y aportar algo al conocimiento, se le ofrecían muchos caminos. Podía arriesgarse a usar métodos originales, recopilar historias clínicas, tal vez contribuir al creciente número de publicaciones sobre observaciones anormales y curaciones extraordinarias; o, en vena humanística, tratar de mejorar la comprensión general de los textos magistrales; o cultivar la anatomía, lo que ciertamente le haría disecar muchos animales; o dedicarse a la historia natural descriptiva. Pero la textura de la labor científica necesaria en todos estos casos distaba mucho de ser idéntica. El humanista-médico era fácilmente asimilable al tipo del erudito; el naturalista-médico, al tipo del lexicógrafo (es verdad que contando con una facultad especial para la observación). En aquella época ninguna de las opciones citadas representaba una camino natural a la experimentación. Sin embargo, el problema más afín a la labor del médico —la comprensión del funcionamiento del cuerpo humano (y, por analogía, del animal) en la salud y en la enfermedad— se presta a la observación y a la experimentación. El médico debe observar y clasificar las enfermedades, así como experimentar en su terapia. Es verdad que el médico hallaba sus bases de raciocinio en las ideas de Galeno, es verdad que procedía de acuerdo con la teoría aceptada de la naturaleza de la enfermedad y de las medidas precisas para ponerle remedio; incluso la atribución de síntomas al estado humoral, la cantidad y la oportunidad de las sangrías y la preparación de medicamentos estaban regidas por reglas más dogmáticas que las actuales. Con todo, fuese cual fuese la instrucción recibida, en todas las épocas el médico debe tener algo de empírico, aprender a usar su propio criterio y adaptar principios generales a casos especiales. Y en el siglo XVI el arte de la medicina distaba mucho de ser estático. Aparte de tener que elegir el médico entre gran variedad de medicamentos herbarios, existían los nuevos remedios inorgánicos, tales como el mercurio, y sustancias desconocidas hasta entonces que procedían de las Indias Orientales y Occidentales. El procedimiento correcto para las sangrías fue objeto de muchas polémicas. Surgieron problemas nuevos: sífilis, heridas de bala, el escorbuto (que causaba estragos en los largos viajes oceánicos) y las plagas ocasionadas por el crecimiento de las ciudades. Un médico podía ejercer guiándose por principios —el uso de contrarios para restaurar el equilibrio de los humores, o de la analogía (calavera, reducida a polvo, en casos de epilepsia)—, pero no podía

limitarse a seguir el libro, aunque sólo fuese porque éste era una guía contradictoria e insuficientemente específica. La parte más importante de la medicina se aprendía con la experiencia y la experiencia provechosa depende de la experimentación.

Tal vez esta lección fue lo más perdurable que aportó Paracelso a la ciencia verdadera. Naturalmente, cuando Paracelso escribe, por ejemplo, «un hombre no puede aprender la teoría de la medicina de su propia cabeza, sino sólo de aquello que ven sus ojos y tocan sus dedos... teoría y práctica juntas deberían formar una y permanecer indivisas... la práctica no debería basarse en la teoría especulativa», hay que tener presente que «práctica» significa para Paracelso algo muy distinto de la práctica racionalista del médico moderno (capítulo 3). Tampoco los métodos empíricos solos constituyen una nueva filosofía de la ciencia. El hecho de que Ambroise Paré utilizase ligaduras y vendajes en lugar de recurrir a la cauterización por el fuego no debe presentarse como ejemplo de ciencia experimental consciente, aunque sí lo era de empirismo auténtico. Paré no sabía latín: era sólo el cirujano real. Pero hasta cierto punto es inevitable que los hombres de mentalidad original que apoyaban los aspectos más prácticos de la medicina, que se veían obligados a ser empíricos (después de todo, Glauber debió de hacer experimentos con su *sal mirabile*), se acercaran de modo más natural a la experimentación que sus colegas con inquietudes decantadas hacia otro lado. Entre disecar para la investigación y llevar a cabo experimentos de índole limitada no hay mucha distancia. Las observaciones anatómicas de las venas y las arterias inspiraron experimentos sencillos sobre el comportamiento de la sangre en el cuerpo vivo, factor que el cirujano conocía bien por ser el encargado de practicar sangrías. Galeno y Aristóteles habían hecho observaciones que llevaban aparejada la vivisección y que volvieron a llevarse a cabo en el siglo XVI: de vez en cuando una herida permitía echar un vistazo a lo que había debajo de la piel. Existe lo que casi era una tradición consistente en probar los venenos y sus antídotos en animales pequeños (y a veces en criminales condenados). Además, la tradición helenística en zoología y fisiología brindaba lo que era tal vez el mejor modelo de ciencia experimental que podía encontrarse en todo el conjunto del saber transmitido. El Aristóteles de la *Generación de los animales* y de la *Historia de los animales* experimentaba además de ser un excelente observador. La descripción que hace Galeno (en *Sobre las facultades naturales*) de los expe-

rimentos efectuados con un perro vivo para demostrar cómo fluye la orina por los uréteres y la uretra casi hubiera podido ser el modelo directo de las demostraciones análogas que hizo Harvey sobre el flujo de la sangre por las venas y las arterias. Especialmente en embriología —dejando otra vez aparte todas las cuestiones teóricas— se hace evidente el legado de la observación atenta del siglo XVI: Aristóteles había abierto huevos en distintas etapas de incubación, como hiciera Alberto Magno en el siglo XIII y harían Fabrizi d'Acquapendente y Harvey más adelante. Lo único que necesitaron hacer los hombres del Renacimiento fue seguir y ampliar unas sendas que ya estaban claramente señaladas.

Puede que no sea forzar la imaginación ver a la medicina práctica desempeñando en el desarrollo de la biología el mismo papel que la tecnología interpretó en la evolución de las ciencias físicas. El médico, el ingeniero y el fabricante tenían habilidad práctica en sus encuentros con la naturaleza, habilidad de la que carecía el filósofo reflexivo y generalizador del estudio, y entretejieron una hebra de empirismo en la tela de la teoría. Asimismo (si eran hombres honrados e inteligentes) les interesaba más la obtención de resultados tangibles que hablar de cómo se obtenían tales resultados. Y del mismo modo que la experiencia artillera o de la química industrial no surtió un efecto simultáneo, directamente positivo, en las ideas del movimiento o en la teoría de cuatro elementos de la materia, tampoco en las ciencias médicas pudo el empirismo modificar de forma inmediata y proporcional la teoría general de la fisiología o de la patología. La repercusión del empirismo fue gradual en todos los casos, sujeta a variaciones de la escala de valores y a ser distinta de lo que la posteridad pudiera deducir si se limitaba a tratar la experiencia práctica como «causa» y el cambio de la teoría como «efecto».

En la historia del descubrimiento de la circulación de la sangre hay un ejemplo revelador de cómo el cambio de las ideas biológicas fue forjado por la observación y el experimento fertilizados por un cambio de perspectiva del pensamiento. Para llegar a su nuevo concepto, Harvey dispuso de poca información anatómica o experiencia médica que no hubiera estado igualmente al alcance de otros durante veinte años como mínimo. Según una conocida anécdota relatada por Robert Boyle, la monografía (1603) de Fabrizi D'Acquapendente sobre las válvulas venosas fue lo primero que le hizo pensar que la

sangre se movía hacia dentro y, por ende, en círculo; pero los anatomistas conocían las válvulas desde hacía muchos años —Fabrizi D'Acquapendente, desde 1574— y las habían hecho compatibles con las ideas tradicionales de flujo hacia fuera en las venas. El gran mérito de Harvey consistió en reordenar datos y observaciones conocidos pero mal interpretados para formar con ellos una generalización nueva y exhaustiva. Como reitera constantemente en su libro *Ejercitación anatómica sobre el movimiento del corazón y de la sangre en los animales* (1628) —puesto que él no era ningún iconoclasta vehemente— muchas de las observaciones en que se basaba ya eran conocidas de Galeno, quien había tratado de explicar la función de las válvulas en el corazón (ignoraba que las hubiera también en otras partes del cuerpo). Otras cosas que observó Harvey aparecían comúnmente con la flebotomía; y, de hecho, cualquier persona que acaricie las venas del dorso de la mano (tal como indica Harvey) notará a la vez la presencia de una válvula y la dirección hacia dentro del movimiento vascular. Así, pues, Harvey se parecía a Galileo porque insistía en presentar una nueva visión de lo que todo el mundo creía comprender y también porque introdujo un aspecto cuantitativo, mecánico, en esta visión, aunque este aspecto no era en modo alguno la esencia de su método.

Harvey, sin embargo, apeló de modo mucho más preciso que Galileo a los datos experimentales y su empleo de un «ejemplo crítico» (aunque nada induce a pensar que acusara la influencia de su gran paciente Francis Bacon) no tiene paralelo en la mecánica. El más grande de los fisiólogos del siglo XVI, Juan Fernel, no había sabido aplicar el método experimental. Sir Charles Sherrington ha señalado expresamente el contraste entre Fernel y Harvey:

> Al parecer, Fernel, para realizar su labor, debe considerarla como parte de un mundo concebido lógicamente. Necesita que los datos se le presenten de una forma que, según su propio razonamiento *a priori*, tenga coherencia. En esa exigencia suya se esconde su inveterada desconfianza del empirismo. «No se puede decir que conocemos una cosa cuya causa nos es desconocida». Y la «causa» incluía no sólo el «cómo», sino también el «porqué». Harvey no obraba así. Cuando le preguntaron «por qué» circulaba la sangre contestó que no podía decirlo. Fernel daba la bienvenida a los datos, pero sobre todo como puntos de apoyo para la teoría; Harvey,

> fueran o no datos, los aceptaba si estaban perfectamente confirmados.[4]

Huelga decir que Harvey utilizaría «datos» sacados de la observación y de los experimentos para demostrar la circulación de la sangre, mientras que Fernel sugirió que «al pasar de la anatomía a la fisiología —esto es, a las acciones del cuerpo— pasamos de lo que podemos ver y sentir a lo que se conoce sólo por meditación», como si cruzáramos una frontera. Pero el propio Harvey nos dice dos veces que su método de descubrimiento *empezó* al meditar sobre el gran volumen de sangre que entra en el corazón. Sherrington exageró el positivismo de Harvey e hizo que sus procesos mentales pareciesen menos sutiles de lo que en realidad eran: algunos «datos» que sin duda Harvey conocía (como la diferencia de color entre la sangre arterial y la venosa, diferencia citada a menudo por Galeno) no los mencionó ni explicó, mientras que la completación periférica de la circulación mediante el paso de las arterias a las venas era para él un acto de fe ciega, del mismo modo que la transmisión de la sangre a través del séptum del corazón lo era para Galeno. Tal como ha subrayado Pagel, Harvey no era sencillamente un empírico o un mecanicista, sino un filósofo biológico. Pagel —contradiciendo a Sherrington— arguye que «la *causa final* —la razón por la cual se hace algo— es para Harvey la primaria y principal de todas las causas, en el arte al igual que en la naturaleza, y para ello invoca la autoridad de Aristóteles».[5] A juicio de Harvey, la sangre circulaba para conservar el calor del cuerpo animal, el calor vital que era generado y mantenido por el corazón. Si Galeno y Fernel encontraban en el alma (entidad inmaterial que controla la estructura material) el origen del proceso y el movimiento corporales, lo mismo hicieron Aristóteles y Harvey, cuestión ésta que en ninguna parte se ve más claramente que en la obra de Harvey titulada *Sobre la generación.*

La sabiduría tradicional (a la que siguen apegados nuestros amigos los franceses) consideraba que el hígado era el principal órgano funcional de todo el cuerpo, puesto que era en él donde los alimentos ingeridos se transformaban en sangre. La sangre era el material integrante de toda la estructura —huesos, carne, nervios—: así, pues, la

4. C. S. Sherrington, *The endeavour of Jean Fernel*, Cambridge U. P., Cambridge, 1946, p. 143.

5. Walter Pagel, «William Harvey revisited. Part 1», en *History of Science*, 8, 1969, p. 6.

sangre salía del hígado central hacia estas partes. La atracción hacia la parte, la asimilación por ésta, la transmisión hacia adelante eran las tres facultades principales de la fisiología galénica, efectuadas en las venas (incluso según Vesalio) por tres grupos distintos de fibras. Comparados con esta función nutritiva primaria, el papel de la respiración o el del latido del corazón eran poco importantes y confusos. En el siglo XVI médicos como Fernel solían hablar de tres «cocciones» o procesos de cambio cualitativo ocasionados por el calor; en virtud de la primera, los alimentos recibidos por el estómago eran transformados en quilo, y éste era transportado por las venas del intestino hasta el hígado. La segunda cocción consistía en la sanguificación de este quilo dentro del hígado mismo. En las partes periféricas la sangre se convertía en carne en la tercera cocción. Las cocciones eran promovidas por el calor animal (de aquí el término) y en el siglo XVI los autores habían empezado a comparar la segunda cocción con la fermentación, proporcionando así la primera analogía «química» con alguna parte del proceso digestivo (Galeno ya había comparado la respiración con la acción de quemar). Si bien el curso principal de la sangre nutritiva iba radialmente hacia fuera desde el hígado, podían producirse revulsiones de la sangre hacia dentro (como, por ejemplo, cuando la sangre abandona una extremidad alzada y ésta se entumece o cuando una persona se desmaya) y era bien sabido que la materia podía moverse hacia dentro con o a través de la sangre desde la periferia del cuerpo. El «envenenamiento de la sangre» podía subir por el brazo del enfermo desde un dedo herido, mientras que el Fantasma de Hamlet se lamenta del

> ... maldito hebenón
> que veloz como el azogue atraviesa
> las puertas y callejones naturales del cuerpo.[6]

Existía, pues, algún concepto tradicional del movimiento complejo de la sangre en el cuerpo, aunque se concebía principalmente como nutrimento que absorbían las partes alejadas del centro.

La sangre procedente del hígado circulaba por la gran vena central del cuerpo, la *vena cava*, cuya porción superior pasa cerca del corazón (pero no a través de él); a la porción inferior se la creía encargada

6. *Gates*, por supuesto, es aquí una palabra esencialmente danesa que significa calle o camino y no, como en inglés, puerta o válvulas.

de nutrir las piernas y el bajo abdomen. Los médicos suponían que mediante la dilatación activa o diástole el corazón atraía una pequeña parte de la sangre hacia su interior a través de la vena que conectaba con la *vena cava* (figura 6.1). La misma dilatación hacía bajar aire por la arteria de aspecto venoso hasta el interior de la cámara (ventrículo) izquierda del corazón. Cuando éste volvía a contraerse en sístole la presión empujaba a la sangre contenida (como había percibido Galeno a partir de la construcción de las válvulas) a salir del ventrículo derecho y penetrar en la vena de aspecto arterial (arteria pulmonar) que transportaba nutrimento a los pulmones y también circulaba con dificultad (según creía Galeno) por pequeños pasadizos del interior del séptum (o pared interventricular fuerte del corazón)

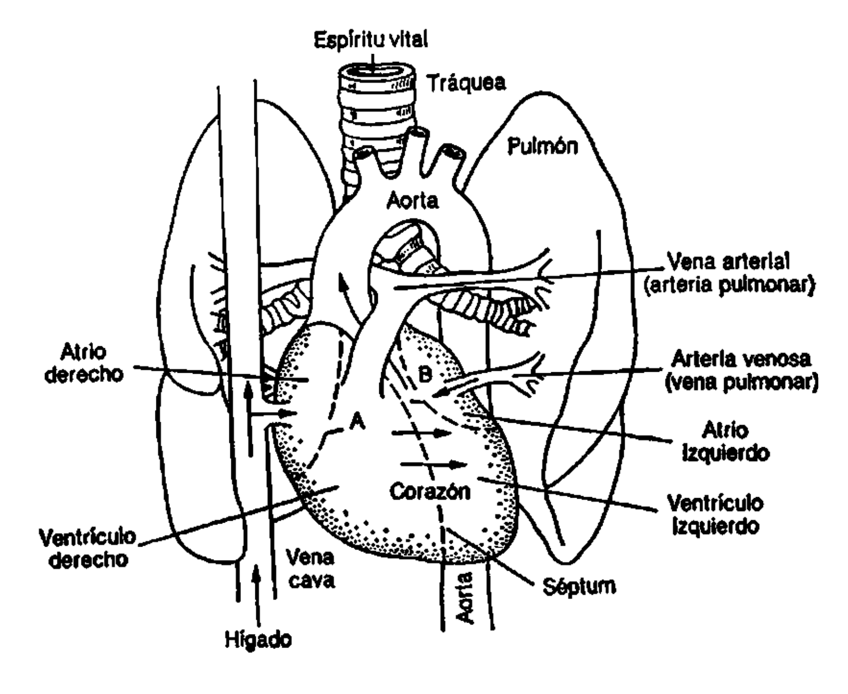


FIGURA 6.1

Diagrama de la estructura del corazón y los pulmones, ilustrando la fisiología galénica

hacia el ventrículo izquierdo lleno de aire. También mediante la sístole el ventrículo izquierdo expelía un humo o vapor de origen incierto (que, de hecho, constituía la respiración espirada) de vuelta a los pulmones. En tercer lugar, durante la sístole un poco de sangre salía del ventrículo izquierdo y penetraba en la aorta y, por ende, de manera general en el sistema arterial del cuerpo. Resumiendo, mientras que la función del ventrículo derecho del corazón era suministrar sangre nutritiva a los pulmones e introducir también un poco en el sistema arterial, la función clara del ventrículo izquierdo era permitir que esta sangre arterial fuera enriquecida por un *pneuma* o «espíritu vital», como lo llamaban a veces, que era necesario para la vida y procedía de la atmósfera. Así, pues, desde el punto de vista anatómico, se percibía la estrecha relación entre el corazón y los pulmones, relación que, desde el punto de vista fisiológico, se interpretaba como una relación entre aire y sangre arterial. Además, se explicaba el hecho de que la asfixia causara una muerte rápida, así como (más vagamente) el carácter modificado o viciado de la respiración espirada. Esta asociación de las arterias con el aire y la respiración era pregalénica; Galeno había insistido con razón en que las arterias no eran tubos de ventilación vacíos, sino que estaban llenas de sangre. Había supuesto que sus paredes densas eran necesarias para la retención del «espíritu vital».

Este esquema de interpretación anterior a Harvey era ingenioso y encajaba con la mayoría de los datos conocidos. El mismo —combinación de los esfuerzos de los médicos griegos a lo largo de muchos siglos hasta Galeno— era un triunfo de la inteligencia humana. Pero tenía defectos que la perspectiva del tiempo hace conspicuos. En el aspecto anatómico, se equivocaba al tratar la vena pulmonar (la arteria parecida a una vena) como si fuera un conducto de aire: la realidad, por supuesto, es que está llena de sangre, como las otras venas. Asimismo, no aclaraba la relación estructural entre los animales con pulmones y los animales sin pulmones (aunque los antiguos sabían que los peces respiran aire); tampoco dilucidó la trascendencia funcional de los pulmones. Para finalizar, lo más importante: Galeno se apartó equivocadamente de su propio principio según el cual había una correspondencia constante entre estructura y función (cosa que le había inducido a declarar, por ejemplo, que el corazón no es un músculo, con lo cual se había equivocado y acertado a medias, por así decirlo) al clasificar la arteria pulmonar (que él veía como una

arteria por su forma) como vena y la vena pulmonar como arteria o conducto de aire cuando por su forma no se parece a una arteria ni a la tráquea. Desde el punto de vista de la función, la descripción tradicional era torpe en lo que respecta al lado izquierdo del corazón: tergiversaba la acción de las válvulas y postulaba una simultaneidad imposible de procesos contrarios. Y los médicos posteriores a Harvey consideran que es un crimen contra la sencillez postular un sistema dual con dos clases de sangre allí donde ellos sólo ven una.

Después de Harvey sabemos también que el pulso de las arterias lo produce el ímpetu sanguíneo nacido de la contracción del ventrículo izquierdo del corazón. La explicación tradicional —en lo que Galeno se había basado en un solo y engañoso experimento— decía que las arterias se expandían y contraían independientemente, aunque en armonía con el corazón. Fernel había argüido que si la hinchazón de las arterias la producía la sangre que salía del corazón, el pulso no sería simultáneo a lo largo de las arterias, como se ha comprobado. Fue una afirmación sagaz, pero también equivocada desde el punto de vista de la hidráulica (en lo que se refiere a los intervalos de tiempo que él pudo medir). Fernel añadió que la contracción activa de las arterias ayudaba a extraer espíritu vital (¡a través de aquellas paredes gruesas!) e introducirlo en la carne circundante.

La teoría perfeccionada antes que nadie por Galeno —aunque no siempre se enseñaba a su manera— la adoptaron universalmente las autoridades médicas subsiguientes y llegó al conocimiento del Occidente latino, gracias a los escritos de Avicena y Averroes, mucho antes de que los textos originales en griego estuvieran al alcance o se comprendiesen del todo. Las instrucciones terapéuticas sacadas de la teoría variaban, pero los datos básicos eran comunes a todos. Los dos planteamientos fisiológicos principales de la teoría: 1) que la sangre venosa nutre las partes; y 2) que la sangre arterial suministra espíritus vitales a las partes, escapaban, huelga decirlo, a las posibilidades de la investigación experimental del siglo XVI. Sin embargo, los anatomistas podían comprobar la concordancia entre el concepto galénico del movimiento de la sangre y la estructura observada en los sistemas venoso y arterial, así como en el corazón mismo. El funcionamiento de las válvulas del corazón no presentó ningún problema: su apertura y su cierre quedaron perfectamente explicados. Pero la densidad del séptum imponía un acto de fe a los teóricos galénicos. Berengario da Carpi describió crédulamente los poros u hoyuelos que

hay en él y a través de los cuales la sangre pasaba del ventrículo derecho al izquierdo, pero Vesalio investigó los hoyuelos del séptum y, al no encontrar ningún paso, en la primera edición de la *Fabrica* escribió: «ninguno de estos hoyuelos penetra (al menos según el sentido) del ventrículo derecho al izquierdo; por consiguiente, quedé maravillado ante la actividad del Creador de las cosas, porque la sangre exudaba del ventrículo derecho al izquierdo a través de pasos que escapan a la vista». En la segunda edición expresó con firmeza aún mayor su fracaso al tratar de descubrir los poros de Galeno y comentó que tenía ciertas dudas sobre la actuación del corazón en este respecto. Vesalio refiere por lo menos un experimento hecho con el corazón de un perro, que volvió a latir cuando le hincharon artificialmente los pulmones después de abrirle el tórax. No obstante, algunos anatomistas seguían afirmando que era fácil encontrar los pasos en los corazones muy jóvenes, aunque en el cuerpo adulto estaban escondidos. Mientras tanto Estienne ya había observado las estructuras de las venas, más tarde denominadas válvulas, que a partir de 1545 aproximadamente serían estudiadas por varios anatomistas; uno de ellos, Amatus Lusitanus (1511-1568), en 1547 disecó doce cadáveres de hombres y animales en Ferrara, tras lo cual formuló una teoría completamente falsa de la actuación de dichas estructuras.

Una modificación importante de la explicación galénica ya era bien entendida cuando Harvey estudiaba en Padua, aunque, por extraño que parezca, el primero en registrarla (aunque probablemente sin que lo supieran los anatomistas del Renacimiento) había sido un médico sirio del siglo XIII, Ibn al-Nafis al-Qurashi, quien, al igual que Vesalio, había defendido la impenetrabilidad del séptum cardíaco: «No contiene un paso visible, como han creído algunos, ni contiene un paso invisible que permitiría que la sangre pasara, como creía Galeno». Así, pues, a partir de las claras sugerencias que encontró en los propios textos galénicos, y justamente como harían los anatomistas del Renacimiento, propuso que sólo *un poco* de sangre era transmitida a los pulmones por la arteria pulmonar desde el lado derecho del corazón, sangre que pasaba por los pulmones y volvía al ventrículo izquierdo por la vena pulmonar. El único objeto de esta revisión era obviar el improbable paso de sangre a través del séptum; seguía suponiéndose que llegaba aire al corazón y que de éste salían humos, por lo que existía una tremenda confusión en lo que se refiere al cometido de la vena pulmonar.

En Europa el primero en publicar una descripción de esta «circulación menor» de la sangre fue el español Miguel Servet (1511?-1553), en una obra en la que exponía sus conceptos unitarios de la Deidad, *Christianismi restitutio* (1553); a causa de este libro Calvino le condenó a la hoguera en Ginebra.[7] El principal interés de Servet era su cristianismo purificado y, aunque ejerció la medicina durante muchos años después de estudiar en la universidad de París, nunca llegó a obtener el título académico. En París habían alabado mucho su habilidad para la anatomía (al igual que la de Vesalio, que fue casi contemporáneo suyo allí). La circulación menor aparece en este último y fatal libro cuando el autor describe cómo el Espíritu Santo penetra en el cuerpo humano. Servet nos dice que el espíritu natural tiene su origen en el hígado y es transformado por la sangre venosa, mientras que el espíritu vital tiene su sede en el corazón y se difunde por medio de las arterias. En tercer lugar, el alma-espíritu, «un rayo de luz, por así decirlo», se encuentra en el cerebro y los nervios. «En todos estos reside la energía del espíritu único y de la luz de Dios.» Seguidamente Servet detalla el origen del espíritu vital en el ventrículo izquierdo del corazón, aunque en realidad más bien se forma en los pulmones «de una mezcla de aire inspirado con sangre elaborada, sutil, que el ventrículo derecho del corazón comunica al izquierdo». En contra de lo que se supone comúnmente, esta comunicación entre los ventrículos no se realiza a través del séptum, sino a través de los vasos pulmonares y los pulmones. La función de los pulmones es «elaborar» la sangre mientras la mezcla con aire se efectúa en la vena pulmonar. Servet da como cierta la existencia de unos canales que conectan arteria y vena en el pulmón mismo y arguye que la arteria es demasiado grande para abastecer sólo al pulmón. Está claro que sus conceptos fisiológicos no son muy diferentes de los de Galeno; sigue imaginando que en la vena pulmonar hay aire además de sangre y, al igual que Galeno, sitúa la generación de espíritu vital en el ventrículo izquierdo. El lector atento observará que Galeno no excluyó la posibilidad de que un poco de sangre llegara al lado izquierdo del corazón por esta ruta, en la que insiste Servet. Así, al menos, lo entendía Harvey cuando escribió:

7. Sólo se conservan tres ejemplares del libro. Se imprimió en enero de 1553; Servet fue ejecutado el 27 de octubre de 1553. El pasaje apropiado aparece traducido al inglés en C. D. O'Malley, *Michael Servetus*, American Philosophical Society, Filadelfia, 1953, pp. 202-208.

> Por lo que dice Galeno, aquel gran hombre, aquel padre de los médicos, parece que la sangre pasa a través de los pulmones desde la arteria pulmonar hacia las diminutas ramas de las venas pulmonares, empujada tanto por los latidos del corazón como por los movimientos del pulmón y del tórax.[8]

Al lector moderno lo que más le sorprende de la breve explicación de Servet es la insistencia en el cambio cualitativo, elaborativo que se produce en la sangre debido a su paso por los pulmones, lo cual de hecho, explica la necesidad de tal paso. Harvey no dio explicaciones semejantes; su ulterior tratado *Sobre la respiración*, al que se alude una vez en *Sobre el movimiento del corazón*, no ha llegado hasta nosotros. Como si discutiera directamente contra Servet (al que sin duda nunca había leído) Harvey argüiría, en su *Segunda disquisición contra Riolán* (1649), que las diferencias entre sangre arterial y sangre venosa son insignificantes y que la hipotética diferenciación del fluido de los vasos en «sangre» y «espíritus» de varias clases era sencillamente imaginaria; una y otra vez repite que «la sangre arterial no difiere esencialmente de la sangre venosa»; si es más colorada a los ojos —sobre todo la que hay en los pulmones—, «sabemos cómo se filtra a través del tejido pulmonar».[9] Y el motivo de estas afirmaciones es evidente: Harvey creía que la finalidad de la circulación era devolver la sangre agotada al corazón, desde donde, revivificada y calentada, volvía al cuerpo. Los pulmones, para Harvey, son un accesorio del corazón en lugar de ser éste un accesorio de aquéllos.

En todo caso, según Servet, al igual que según Galeno, sólo una parte de la sangre venosa pasa por el corazón y los pulmones camino de las arterias. Hasta este punto su concepto del tránsito pulmonar (como debería llamarse, en vez de «circulación menor») sólo parcialmente abarca la verdad, y lo mismo cabe decir de todas las presentaciones de esta idea que precedieron a la de Harvey. A pesar de la desaparición casi total de *Christianismi restitutio*, hay algunos testimonios de que el libro se leía. Se ha dicho que el tratamiento de la circulación menor por parte de otro médico español, Juan Valverde, en 1556, imita directamente el de Servet, toda vez que Valverde

8. William Harvey, *On the motion of the heart and blood in animals*, trad. de Robert Willis, cap. VII; edición Everyman, 1907, p. 53.
9. *Ibid.*, pp. 140, 146.

afirmó, al igual que Servet, que la vena pulmonar contiene tanto sangre como aire (más tarde, en 1560, escribió que contenía una copiosa cantidad de sangre). Valverde había estudiado con Realdo Colombo, en Pisa y en Roma, a partir de 1545 aproximadamente, comentaba que con frecuencia había observado las apariencias anatómicas con Colombo, y no parece reclamar originalidad para sí mismo. Colombo había sido a su vez discípulo de Vesalio, al que sucedió durante una breve temporada como maestro de anatomía en Padua, y es posible que la génesis de la idea de la circulación menor tuviera lugar allí, y así llegara a conocimiento de Valverde. Lo cierto es que Colombo afirmó que la nueva idea era suya y desconocida hasta entonces, en un tratado que se publicó póstumamente en 1559 y que muy bien podría ser anterior al publicado por Valverde en 1556. El razonamiento de Colombo sobre la circulación de la sangre es superior a todos los que lo habían precedido. Dijo claramente que la sangre pasaba del ventrículo derecho al pulmón a través de la arteria pulmonar; que en el pulmón era atenuada; y luego, junto con aire, transportada por la vena pulmonar hasta el ventrículo izquierdo. Hizo especial hincapié en la observación de que, al abrirse la vena pulmonar, se comprueba que está llena de sangre arterial de vivo color.

En lo sucesivo, y hasta la época de William Harvey, varios anatomistas describieron el recorrido a través de los pulmones desde el lado derecho del corazón hasta el izquierdo. Es importante reconocer que, si bien a los médicos que lo invocaban se les puede calificar correctamente de precursores de Harvey, en el sentido de que el paso de sangre por los pulmones sería un elemento esencial de toda la circulación, el reconocimiento anatómico de este hecho no aportaba una visión parcial de toda la verdad de la circulación. Anatómicamente, la ruta pulmonar se limitaba a evitar el séptum; no cambiaba nada más. Desde cierto punto de vista, lo que decía Servet acerca de que en el corazón y los pulmones se producía un cambio cualitativo de la sangre era un grave error, toda vez que dificultaba la comprensión de la idea según la cual no hay más que un volumen de sangre en el cuerpo, un volumen que se mueve rápidamente de las venas a las arterias, y viceversa. Ninguno de los predecesores de Harvey consideró el problema que él usó como punto de partida (según relata en el capítulo VIII): «cuál sería la cantidad de sangre transmitida, en qué breve período de tiempo podía efectuarse su paso, etcétera...». Por otra parte, sus precursores seguían muy absortos en el problema

de los espíritus, el problema que Harvey había soslayado decididamente: dejaron sumido en extrema oscuridad el funcionamiento de la vena pulmonar, del ventrículo izquierdo del corazón y de todo el sistema arterial. Todos estos interrogantes los aclararía definitivamente Harvey a un nivel que podríamos denominar «hidráulico» o «de flujo fluido». De hecho, los anatomistas anteriores trataban de resolver un problema distinto del de Harvey. Lo único que les importaba era encontrar la ruta que utilizaban la sangre y los espíritus vitales para penetrar en las arterias en vista de la impenetrabilidad del séptum. El problema de Harvey era doble: primeramente, explicar la función de las válvulas de las venas (válvulas que, como se comprendió antes de su época, obstruían el flujo de sangre hacia fuera a lo largo de las venas); y, en segundo lugar, despachar la gran cantidad de sangre que, como él sabía, debía de entrar en el corazón. La novedad de su método era que no hacía el menor caso de la cuestión de los espíritus vitales y se concentraba en una dificultad totalmente mecánica, y parcialmente cuantitativa, que se hallaba latente en la doctrina aceptada. Esta dificultad no se le había ocurrido a nadie antes que a él, porque nadie había dudado de que el contenido de las venas y de las arterias respectivamente fuera absorbido por las partes que lo atraían hacia fuera desde los depósitos centrales, el hígado y el corazón. La antigua teoría de la circulación menor fue, pues, útil a Harvey porque, en la etapa apropiada de la evolución de sus propias ideas, el paso de sangre del lado derecho al lado izquierdo del corazón encajó como pieza parcialmente completa del rompecabezas; pero la teoría en sí representaba un callejón sin salida por cuanto no era más que una variación de la teoría de Galeno.

De los autores que, entre Servet y Harvey, escribieron sobre el sistema cardiovascular el que más se acercó al concepto de la circulación sistemática fue Andrea Cesalpino (1519-1603), que abandonó Pisa, donde había sido profesor de medicina y director del jardín botánico, en 1592, como hizo también Galileo. A diferencia de éste, pero al igual que Harvey, Cesalpino era un ferviente admirador de Aristóteles y, de acuerdo con la tradición aristotélica, consideraba al corazón como el órgano central del cuerpo. En los dos libros de las *Quaestionum medicarum* (1593) se advierte que comprendía que las válvulas de las venas proclaman un flujo hacia dentro de la sangre venosa, sin la consiguiente remodelación de la teoría galénica. «Dicho de otro modo —escribe Walter Pagel—, Cesalpino se detuvo

antes de seguir una línea que le hubiera llevado a anticiparse al descubrimiento de Harvey.»[10] Es cierto que concibe una *circulación* de la sangre, mas para él éste era un término casi alquímico que indicaba la elaboración de sangre en los pulmones, como en el vaso de reflujo llamado «pelícano».

William Harvey (1587-1657) empezó sus estudios de medicina en Padua en 1597, año de su graduación en Cambridge. Permaneció en Padua hasta 1602: «era muy colérico», relata Aubrey, «y en sus años mozos llevaba una daga (siguiendo la moda de entonces), pero este doctor era propenso a sacar su daga a la menor excusa». Tenía por maestro a Fabrizi d'Acquapendente, y siendo «el primero que sintió curiosidad por la Anatomía en Inglaterra», difícilmente habría podido tener mejor profesor: el descubrimiento de Harvey nació obvia y directamente de la escuela italiana, a cuyos miembros hace frecuentes alusiones. Es imposible saber con certeza si fue en Inglaterra o en Italia donde Harvey empezó a sentir admiración por la filosofía biológica de Aristóteles, pero Pagel la atribuye a su experiencia en Padua: «lejos de ser esto un indicio de atraso intelectual por parte de Harvey», prosiguió Pagel, refiriéndose al distinguido estudio de epistemología en Padua durante el siglo XVI, la lealtad de Harvey «demuestra cuán abierto estaba al modernismo científico aristotélico de una escuela continental», modernismo que abarcaba los métodos técnicos de disección comparado-anatómica así como metodología científica.[11] Si bien donde más explícita resulta la admiración de Harvey por el antiguo maestro es en su libro posterior *Sobre la generación* (1651), también resulta obvia en el último capítulo de *Sobre el movimiento del corazón*, donde, a decir verdad, se nombra a Aristóteles varias veces y Harvey se deleita haciendo gran variedad de comparaciones de sistemas cardiovasculares pertenecientes a distintas clases de animales, siguiendo su propio precepto de que está claro que se equivocan aquellos que, al mismo tiempo que pretenden hablar de morfología animal en general, limitan sus investigaciones al cadáver humano. «Así, la naturaleza», concluye con palabras que hubieran podido ser del propio Aristóteles, «siempre perfecta y divina, que no hace nada en vano, ni ha dado un corazón allí donde no hacía

10. Walter Pagel, *William Harvey's biological ideas*, Basilea y Nueva York, 1967, p. 175.
11. *Ibid.*, p. 19.

falta, ni lo ha producido antes de que sus oficios fueran necesarios». De esta reversión, por así decirlo, de la fisiología galénica a la del maestro más antiguo, Harvey, «impregnado de Aristóteles —escribe Pagel— profundamente arraigado en su personalidad», era plenamente consciente, y nunca más que en los últimos párrafos de su gran obra, donde declara:

> ¿Tampoco vamos a estar menos de acuerdo con Aristóteles en lo que concierne a la soberanía del corazón, ni vamos a inquirir si recibe sentido y movimiento del cerebro? ¿Si sangre del hígado? ¿Si es el origen de las venas y la sangre? y más de la misma descripción. Los que presentan estas proposiciones contra Aristóteles pasan por alto o no comprenden correctamente los argumentos principales, en el sentido de que el corazón es la primera parte que existe, y que contiene dentro de sí sangre, vida, sensación, movimiento, antes de que el cerebro o el hígado existiesen o hubieran aparecido claramente o, en todo caso, antes de que pudieran cumplir alguna función.

El corazón, prosigue Harvey, especie de criatura interna, es anterior al cuerpo al que sigue; como el Sol para Copérnico, es «como el príncipe en un Reino», del mismo modo que al Sol «bien se le pudiera designar el corazón del mundo».[12]

Del mismo modo que Arquímedes para Galileo, también un Aristóteles no «galileano», un Aristóteles renacentista casi insospechado por la Edad Media, para William Harvey. Visto sobre este fondo (citando una vez más a Walter Pagel), Harvey «no era un moderno». Así lo dijo el viejo Aubrey: instruido personalmente por el gran médico «qué compañía frecuentar, qué libros leer, cómo organizar mis estudios, en resumen, me ordenó que acudiera a la propia fuente y leyese a Aristóteles, Cicerón, Avicena y llamó calzas de mierda a los neuróticos». Y aunque a las válvulas cardíacas las llama «chapaletas en un fuelle», Harvey distaba mucho de considerar la sangre sencillamente como un fluido, el corazón como una bomba: más bien concebía que ambos estaban dotados de vitalidad, que la sangre recuperaba en el corazón su «fluidez, su calor natural y [haciéndose] poderosa, férvida, una especie de tesorería de la vida, e impregnada de espíritus, podría decirse con bálsamo». Así como el

12. Harvey, *loc. cit.* (en nota 8), pp. 57, 104, 105.

frío precede a la muerte mientras que el calor pertenece a la vida, veía el corazón como «el amador de la naturaleza, el origen del fuego nativo» desde donde nueva sangre, imbuida de espíritus, era enviada a través de las arterias para que llevara calor a todo el cuerpo (capítulos VIII y XV de *Sobre el movimiento del corazón y la sangre en los animales*).

Sin embargo, Harvey *era* un moderno, y nunca lo era más que en los aspectos experimentales y mecánicos de la investigación del corazón, donde a los ojos modernos (de todos modos) su teoría de la circulación parece desarrollada del todo y perfectamente demostrada. Al describir la «armonía o ritmo» de las contracciones casi simultáneas de aurículas y ventrículos, donde sólo es visible un movimiento, explica:

> Tampoco es esto por ninguna otra razón que la de estar en una pieza de maquinaria en la cual, aunque una rueda da movimiento a otra, todas las ruedas parecen moverse simultáneamente ... Lo mismo sucede en el tragar: mediante la elevación de la raíz de la lengua y la compresión de la boca, el alimento o la bebida es empujado al interior de las fauces ... Sin embargo, todos estos movimientos, aunque ejecutados por diferentes y distintos órganos, suceden armoniosamente y en tal orden que parecen constituir un solo movimiento y acto ...[13]

Iríamos demasiado lejos si afirmáramos que Harvey compara estos movimientos corporales involuntarios, concentrados y rápidos con el funcionamiento automático, eslabonado, de las piezas de una máquina, *excepto* en el sentido de que ambas series de acontecimientos pueden ser consecutivas aunque aparezcan simultáneas a los ojos. Pese a ello, qué significativa es la comparación. Por otra parte, Harvey no dice que el sistema cardiovascular se reduzca a un complejo de bombas y conductos —al contrario, deja bien claro que es mucho más—, pero gran parte de su argumento depende de la validez del análisis hidráulico: de hecho, invoca en silencio el principio de la continuidad hidráulica según el cual el ritmo de flujo a través de todas las partes sucesivas del sistema debe ser constante. Harvey no expone su argumento *como si* el corazón fuera una bomba mecánica; las válvulas, chanaletas; las venas y las arterias, conductos; la sangre, un fluido corrien-

13. *Ibid.*, p. 37.

te, etcétera; aunque, por otra parte, es muy posible que este «como si» pertenezca más bien a la etapa de demostración que a la de descubrimiento primario. Aun así, la historia de las válvulas de Boyle, pese a ser aristotélica porque nos muestra que Harvey confiaba en que «una causa tan providente como la Naturaleza no habría querido tantas válvulas sin designio», muestra también qué primario era el interés de Harvey por la naturaleza y la dirección del movimiento del fluido, y el propio Harvey dice que el volumen del flujo se presentaba como un problema primario. En una etapa posterior, quizá no encontremos en toda la ciencia del siglo XVIII nada que parezca más obviamente moderno, más paradigmático del método científico, que el cómputo en principio de Harvey del ritmo de flujo de sangre a través del corazón «asumido meramente como base para el razonamiento», del cual saca la conclusión de que en una media hora la cantidad que pasa por el corazón debe como mínimo sobrepasar la que contiene todo el cuerpo (capítulo IX). Es difícil imaginarse a Aristóteles, enemigo acérrimo de lo mecanístico y lo cuantitativo en biología, haciendo semejante valoración; Galeno la habría comprendido, pero también la habría dejado a un lado alegando que atribuir semejante flujo masivo, rápido a la sangre era absurdo. También aquí se presenta la posibilidad de una analogía hidráulica (moderna): los antiguos consideraban que la rapidez con que se desangraba el cuerpo a causa de una arteria seccionada era como el vaciado de un depósito, mientras que Harvey consideraba que la sangre viva, borboteante, era achicada por el corazón. La idea de la posibilidad de *movimiento* (la primera palabra del título de Harvey) de fluido debe preceder, como es lógico, a cualquier otra idea de circulación y su propósito; y, al menos hasta este punto, podemos decir que al principio los prejuicios de Harvey eran más favorables a la cinemática que a la estática.

De la génesis y el comienzo del descubrimiento de Harvey, de la marcha de su disección humana y su vivisección de animales, no sabemos si la investigación iniciada presumiblemente en Padua prosiguió en Londres, en medio de una ajetreada y fructífera vida profesional. La conocida alusión a la circulación que aparece en su manuscrito *Conferencias*, fechada en 1616, se considera ahora una añadidura posterior (el libro de Harvey anota la presentación de sus puntos de vista en semejantes conferencias públicas). Por muy metafísica que fuese la predisposición del propio Harvey a favor de la solución que finalmente propuso, los argumentos que presentó a favor de ella

son marcadamente positivistas. Considerad los hechos, les dice una y otra vez a los lectores, enumerándolos con gran detalle. Aunque los datos puramente anatómicos contenían pocas cosas realmente nuevas, hizo que cada argumento fuese revelador, por ejemplo, en el estudio de la acción de las válvulas vasculares y de la correspondencia de la diástole cardíaca con la sístole arterial. Gran número de observaciones que eran discordantes dejaron de serlo basándose en la hipótesis de la circulación de la sangre, como se ve de forma muy clara en sus comentarios sobre la circulación fetal. La existencia de una intercomunicación entre la arteria pulmonar y las venas del feto mamífero, intercomunicación que desaparece después del nacimiento, la conocían todos los anatomistas, pero con anterioridad a Harvey nadie había correlacionado este cortocircuito de los pulmones con la supuesta sudación de sangre a través del séptum o con su paso por los pulmones. Quedó para Harvey la tarea de demostrar que la circulación fetal evita los pulmones porque éstos se hallan colapsados e inactivos. Cuando más original y sorprendente se muestra es al utilizar el método comparativo: «Si los anatomistas hubieran estado tan versados en la disección de los animales inferiores como lo estaban en la del cuerpo humano, las cuestiones que hasta ahora los han tenido perplejos y llenos de dudas les habrían encontrado, en mi opinión, libres de toda suerte de dificultad».[14]

La admonición de Harvey fue aceptada por multitud de biólogos en las postrimerías del siglo XVII, incluyendo a Marcelo Malpighi, quien observó por vez primera que la sangre pasaba de las arterias a las venas a través de los vasos capilares de los pulmones de una rana; fue el eslabón final que remachó en un círculo el movimiento de Harvey. Éste comprobó que la manera más fácil de estudiar el corazón eran los experimentos con animales pequeños o con peces: por ejemplo, observar el efecto de las ligaduras alrededor de los vasos grandes, inundar o drenar las cavidades del corazón. Correlacionó acertadamente el corazón de una sola cavidad con la falta de pulmones y el corazón de dos cavidades con la posesión de pulmones, señalando que el ventrículo derecho, que se limita a mandar la sangre a través de los pulmones, es ligeramente más débil que el izquierdo, que la manda alrededor de todo el cuerpo. Los experimentos de Harvey probaron que en cada ciclo de expansión y contracción el corazón

14. *Ibid.*, p. 42.

recibe y expele una cantidad significativa de sangre y no sólo unas cuantas gotas; sus cálculos demostraron (como hemos visto) que todo el volumen de sangre debe dar la vuelta al cuerpo cuando menos cincuenta veces al día. En su segundo grupo de experimentos Harvey probó también que la sangre se aleja del corazón por las arterias y se acerca a él por las venas. Estos experimentos están relacionados principalmente con el sujeto humano y son los que se le ocurrirían de forma natural a un médico versado en flebotomía. Examinando las venas superficiales del brazo, demostró que éste se hincha de sangre cuando se aprietan las venas, sangre que desaparece cuando se obstruye el flujo arterial. Comprobó que las válvulas de estas venas impedían que la sangre se alejase del corazón y que manipulando las arterias era imposible obligar a la sangre a pasar por ellas salvo en dirección contraria. La sangre llenaba siempre una vena vacía desde la dirección de la extremidad. Por otra parte, demostró que en la vena yugular las válvulas estaban construidas de un modo que permitiera sólo el flujo unidireccional hacia el corazón y que, por consiguiente, su función no era (como creían algunos) impedir que el peso de la sangre cayera hasta los pies. En el mismo sentido general Harvey citó lo observado en las heridas y sangrías y, además, alegó la experiencia de los médicos como prueba de que la sangre era el agente mecánico por medio del cual los venenos o los principios activos de los medicamentos alcanzan rápidamente todas las partes del cuerpo.

Tal como comentó Galileo en otro contexto, una vez hecho y aceptado un descubrimiento como el de la circulación de la sangre, su demostración parece obvia; lo difícil es dar con él en primer lugar. Desde luego, al lector moderno le resulta más fácil seguir el razonamiento experimental y anatómico con el cual Harvey hace valer el principio de la circulación —lo único que le faltaba a él era ver el paso de las células sanguíneas por los capilares, que Malpighi describió por primera vez en 1661— que comprender el contexto filosófico y médico del que surgió el descubrimiento, así como percibir la sutil interacción de los factores del pensamiento y la experiencia primerizos de Harvey que pudieron tanto favorecer como impedir el descubrimiento, sobre todo porque nosotros sólo podemos reconstruir esa interacción a partir de la crónica *postfactum* escrita por Harvey al final. Una medida de la diferencia entre la perspectiva de Harvey, incluso del Harvey maduro, y la nuestra es la atención

relativamente escasa que prestó él a la función de la doble circulación, que a nosotros nos parece pedir a gritos un comentario: ¿Cómo fue capaz de dejar este aspecto del asunto allí donde lo habían dejado los griegos? En más de una ocasión Harvey se lamenta de que a lo largo de la historia los anatomistas se hubieran dejado engañar por la asociación estrecha entre el corazón y los pulmones, y tiene razón; sin embargo, no percibe la insuficiencia de la idea griega de la «refrigeración» de la sangre (en este sentido Servet parece más presciente). Si estos aspectos de la investigación de Harvey nos dejan perplejos, ello se debe a que nosotros no podemos comprender con su mentalidad pre-química, ni distinguir correctamente en la *De usu partium* de Galeno, las expresiones que él encontraría sensatas y las que juzgaría absurdas. Otra medida de la dificultad de entender la ciencia médica de la época de Harvey es que nos cuesta apreciar los reparos a una doctrina que parece un resumen tan obvio de la historia anatómica de las dos generaciones precedentes. El descubrimiento de Harvey, fruto seguramente de varios años de paciente investigación y recibido con desprecio e incredulidad, fue debatido durante al menos veinte años. Algunos críticos, como dijo Harvey, se oponían a él porque preferían poner en peligro la verdad a poner en peligro las creencias antiguas. Otros creían haber descubierto argumentos técnicos de anatomía contra la circulación de la sangre; o creían que sólo circulaba una porción de ella; o que la sangre venosa y la arterial no podían ser el mismo fluido. Incluso la anatomía básica de la irrigación de los principales órganos del cuerpo (especialmente del hígado) seguía siendo dudosa y apenas se había empezado a interpretarla fisiológicamente; la circulación capital y el cambio de color de la sangre seguirían sumidos en el misterio hasta mucho después de morir Harvey. La originalidad de éste estribaba en que prefería afrontar estos problemas nuevos a seguir tolerando las contradicciones del sistema antiguo, pero en esto le secundaron pocos contemporáneos. Como ocurre tan a menudo en la ciencia, si se avanzó no fue porque se resolviera del todo un problema antiguo, sino porque éste fue replanteado de un modo que permitiera resolverlo, creando problemas nuevos por el mismo hecho de replantearlo. Harvey hizo una pregunta que, en sus términos precisos, no había dejado perplejo a ninguno de sus predecesores, y la respuesta que dio a ella fue importante, no sólo por ser correcta o contraria a las ideas imperantes, ni siquiera, tal vez, por introducir una nueva clase de investigación cien-

tífica. La influencia de Harvey en cuanto a esto último fue significativa (tanto en su libro sobre la generación como en *Tratado anatómico sobre los movimientos del corazón y de la sangre en los animales*), pero no fue totalmente inesperada, y algunos de los métodos nuevos explotados por posteriores fisiólogos del siglo XVII, tales como la investigación «bioquímica» y la microscopia, eran totalmente desconocidos para Harvey. Quizás el más importante de sus logros consistió en dejar problemas sin resolver, no problemas ciegos, inexpugnables, sino preguntas a las que se podía responder del modo que el propio Harvey había declarado. Del mismo modo que la mecánica del siglo XVII se basó en los problemas irresueltos (o resueltos imperfectamente) que dejara Galileo, también los problemas experimentales de la biología se heredaron de Harvey.

Mientras que la filosofía biológica de Harvey era renacentista, aristotélica, y creaba el futuro a partir de una valoración más rica del pasado, su descubrimiento fisiológico, una vez propuesto, pudo insertarse en un contexto intelectual muy distinto. En sus escritos se advierten algunas señales de impaciencia ante el funcionalismo teleológico de Aristóteles y Galeno («los medios existen porque el fin es bueno»), pero ésta no era una reacción general y en su libro *Sobre la generación*, por ejemplo, insiste en que la concepción puede producirse sin un agente material. Esta postura aristotélica podría considerarse como positivista —no podía encontrar ningún agente material— y ciertamente el ataque furioso que lanzó contra la doctrina proteica de los «espíritus» en la *Segunda disquisición contra Riolan* (1649) parece de tal índole: «Las personas de información limitada», escribe austeramente, «cuando no aciertan a encontrar la causa de algo, muy a menudo contestan que es obra de los espíritus; y, por ende, introducen espíritus en todas las ocasiones». Tal como arguye con cierta extensión, en un pasaje que también habla directamente al lector moderno, la doctrina de los espíritus, incluso cuando es más que un «vulgar subterfugio de la ignorancia», abarca múltiples cosas, que van de los espíritus del vino (alcohol) al espíritu de fortaleza; ¿qué es el espíritu, pregunta, si no la causa invisible, desconocida, de los actos? Si hay un espíritu activo en la sangre, arguye Harvey, con una intención que es tan antigriega como antialquímica, se trata de un componente esencial de la sangre completa: está a punto de decir (pero no lo dice) que «sangre más espíritu» es simple-

mente una duplicación innecesaria e inútil de «sangre» a secas.[15] René Descartes (1596-1650) no tuvo ningún titubeo parecido y evitó por completo un concepto tan dudoso. También él hizo algunos estudios de anatomía, especialmente del ojo, y escribió un tratado titulado *De homine*; aunque no fue, en el *Discurso del método* (1637), el primero en apoyar abiertamente el descubrimiento de Harvey, sí fue el primero en sacarlo de un estrecho contexto profesional para demostrar su coherencia perfecta con una idea totalmente nueva de la naturaleza: la filosofía mecanicista. De hecho, es obvio que Descartes supuso —¡cosa que ha causado una irritación inmensa a todos los historiadores de la medicina que le siguieron!— que entendía la esencia verdadera del descubrimiento de Harvey mucho mejor que el autor del mismo.[16]

«¿Qué hace que el cuerpo sea internamente activo, capaz de responder, de moverse, de hablar, etcétera?» Durante dos mil años la respuesta habría sido: «los espíritus», con interminables explicaciones sobre los tres espíritus básicos (el natural, el vital y el animal o, como diríamos nosotros, psíquico). Descartes los abolió todos: el principio del movimiento yacía en el movimiento mismo, una cantidad perdurable e invariable del cual residía en el universo. Parte de esta constancia del movimiento que Descartes halló en el universo es, por supuesto, manifiesta en la circulación perpetua de cuerpos grandes como los planetas, pero en su mayor parte se encontraba en los movimientos invisibles de las partículas más pequeñas de la materia (véanse más adelante las pp. 298-312). De tales partículas, grandes y pequeñas, en reposo o en movimiento, también estaba hecho el cuerpo animal y humano y, como tal, se comportaba como un complejo en el gran esquema natural. Si al cuerpo animal, o al cuerpo humano sin su alma racional, se le supusiera puramente material en su composición, pero apropiadamente ordenado en su estructura, de tal manera que formase, por así decirlo, una máquina, entonces podría cumplir todas las funciones de que son capaces los animales o los hombres salvo la de pensar y la de tener conciencia de sus propias sensaciones. De esta manera el calor animal del corazón podría surgir, como el calor natural de la fermentación, de los movimientos invisibles de las

15. *Ibid.*, pp. 141-143.

16. La acusación de que Descartes reclamaba para sí mismo el descubrimiento de la circulación es injusta: él la atribuía a «un médico inglés». Lo único que reclamaba para sí mismo era la explicación mecánica de la diástole y la sístole del corazón.

partículas. A decir verdad, Descartes describió el corazón como una bomba automática accionada por su propio calor (¡anticipándose en unos centenares de años a la moderna bomba Humphrey!): con la contracción entraría en cada ventrículo un poco de sangre que, al evaporarse súbitamente en la cavidad caliente, expandiría todo el corazón cerrando así las válvulas de entrada. Esta expansión sanguínea también abriría las válvulas de salida, por lo que la sangre abandonaría el corazón para penetrar en los pulmones y las arterias, donde volvería a condensarse en forma de líquido y el ciclo se repetiría. El calor del corazón, sobre el cual había escrito Harvey, explicaba así su ciclo puramente mecánico de expansión y contracción. En sus especulaciones sobre el corazón Descartes (al que vemos copiar sin escrúpulo alguno, y sin que vacile su imaginación, el minucioso análisis de Harvey) fue mucho más allá que el inglés, puesto que asignó funciones al órgano. Suministraba calor al estómago para mezclar los alimentos; completaba la mezcla destilando la sangre en el corazón «cien o doscientas veces al día» (según Descartes, los pulmones eran el condensador en el cual la sangre volvía al estado líquido); por medio de la comprensión de la sangre forzaba a «ciertas de sus partes» a pasar a través de poros especialmente creados como tamices para darles entrada en las diversas partes del cuerpo donde formaban humores; y era el hogar donde ardía una llama muy pura e intensa que, ascendiendo hacia el cerebro, penetraba por los nervios (que él imaginaba como conductos huecos) para activar los músculos. En *De homine* Descartes desarrolló la teoría de que el flujo de los espíritus era controlado en el cerebro por la glándula pineal, especie de válvula que funciona bajo la dirección de la volición consciente. Según el estudio de la fisiología del comportamiento realizado por Descartes, la volición desempeñaba un papel pequeño incluso en el hombre, único ser capaz de pensamientos abstractos y sensaciones verdaderas (es decir, sensaciones que pudieran juzgarse objetivamente) y ninguno en la actividad de las criaturas inferiores. Prestó mucha atención al estudio de los mecanismos motores y los actos reflejos —como, por ejemplo, localizar los mecanismos involuntarios que hacen que los músculos del brazo se contraigan para retirar la mano del fuego cuando nos la quemamos, al mismo tiempo que los músculos faciales se contraen en una mueca de dolor, brotan las lágrimas y soltamos un grito. Consideraba que la mayor parte de la actividad corporal se debía a procesos mecánicos de esta índole, respuestas

automáticas a estímulos externos efectuados por el sistema nervioso; pero, aunque la fisiología cartesiana era corroborada hasta cierto punto por la investigación anatómica de las relaciones del nervio, el cerebro y el músculo, se trataba principalmente de una estructura puramente conceptual. Descartes se anticipó a algunas de las condiciones de la fisiología del siglo XIX sin la esmerada base experimental de ésta.

La labor de Harvey fue un paso importante hacia una manera mecanicista de abordar los problemas biológicos y llevaba aparejado un intento de acabar con la supremacía de los espíritus basada en una investigación experimental determinada. Los escritos de Descartes, más amplios y más especulativos, elevaron el mecanicismo a la categoría de verdad universal, tanto en física como en biología. El alma y el cuerpo material sólo podían tener en común un único y misterioso punto de contacto; nada podía atribuirse al alma excepto el pensamiento. La fisiología antigua postulaba varias almas inmateriales o espíritus, cada una de ellas encargada de un grupo de funciones corporales; para Descartes esas funciones eran el resultado de procesos mecánicos, tanto como lo eran las apariencias y movimientos diferentes de un complicado reloj mecánico. El hecho, según dijo en el *Discurso del método*, no parecería extraño a los que conocieran

> la variedad de movimientos ejecutados por los diferentes autómatas, o las máquinas móviles fabricadas por la industria humana, y con la ayuda de sólo unas pocas piezas, comparadas con la gran variedad de huesos, músculos, nervios, arterias, venas y otras partes que uno encuentra en el cuerpo de cada animal. Tales personas mirarán este cuerpo como una máquina hecha por las manos de Dios, que está incomparablemente mejor organizada y adecuada a movimientos más admirables que cualquier máquina de invención humana.

El cuerpo no se mantenía vivo y activo debido a la acción de una o más fuerzas vitales o espíritus o almas, sino gracias exclusivamente a la interrelación de sus piezas mecánicas; la muerte, por su parte, se debía a un fallo de tales piezas. Por lo tanto, sin la intervención de ningún factor inmaterial, toda la fisiología se hallaba potencialmente al alcance del conocimiento humano, ya que lo único que se requería era la investigación de procesos mecánicos, complejos y complicados en verdad. Huelga decir que este concepto de Descartes era prematuro, muy superior a las posibilidades del equipo científico de su

época, y no se tradujo en ningún descubrimiento fisiológico inmediato. Con la posible excepción de lo relativo al ojo, el contenido objetivo de su teoría biológica era totalmente engañoso. Pero la influencia de su concepto general en la anatomía y la fisiología de finales del siglo XVII fue profunda.

Inevitablemente, los intentos directos de aplicar principios cartesianos a la fisiología, pese a ser muy interesantes, produjeron resultados ingenuos. *Sobre el movimiento de los animales* (1680-1681), de Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), renombrado matemático y astrónomo, fue el más complejo de los ensayos que juntaban la geometría con la fisiología del modo que indicaron Galileo y Gassendi, así como Descartes. Borelli trató de computar la tracción mecánica ejercida por los músculos, de analizar la acción de éstos en el apalancamiento y de explicar los actos complejos que intervenían en el correr, el andar, el volar y el nadar (también Harvey se ocupó de esto en unos estudios que no se han publicado hasta hace poco, siguiendo a Aristóteles mucho antes). Varias veces intentó ver el corazón y el sistema vascular como un solo sistema hidráulico, para lo cual calculó las velocidades de flujo en los vasos, etcétera, de un modo que los médicos no volverían a emplear hasta el siglo XIX. A juicio de Borelli, el aire inspirado cumplía en el cuerpo una función puramente mecánica: las partículas de aire, comprimidas en la sangre arterial, vibraban y controlaban así, como el péndulo de un reloj, las funciones periódicas del cuerpo: «el autómata (reloj) tiene cierto parecido indistinto con los animales, por cuanto ambos son cuerpos orgánicos automotores que emplean las leyes de la mecánica y son movidos por poderes naturales».[17]

Sin embargo, el mecanicismo cartesiano y sus descendientes, la «iatrofísica» y la «iatromecánica», constituyen sólo un tema en el pensamiento biológico del siglo XVII; otras corrientes del pensamiento, como la tradición aristotélica a la que Harvey pertenecía, eran partidarias del vitalismo y de un escepticismo esencial en lo referente a reducir los fenómenos vivos a explicaciones físicas y químicas. Las reacciones contrarias a las hipótesis demasiado fáciles de la ciencia cartesiana y la intratabilidad de la propia naturaleza viva acabaron favoreciendo a la filosofía vitalista de la naturaleza durante un largo período (más o menos de 1730 a 1840) hasta que, a su vez, nuevos

17. G. A. Borelli, *De motu animalium*, Roma, 1680-1681, II, p. 226.

conocimientos e ideas, así como la prometedora evolución de la química, propiciaron de nuevo el retorno más esperanzado al reduccionismo, ya muy alejado de la antigua pauta cartesiana. Sin embargo, a pesar de sus defectos y absurdidades, la justificación filosófica cartesiana de la investigación experimental en biología tuvo un valor permanente; transformada por la influencia de Newton, inspiró investigaciones experimentales tan importantes como las de Stephen Hales (*Vegetable staticks*, 1727). Descartes creó el concepto del «modelo» biológico. No podemos experimentar con el corazón animal vivo sin trastornarlo o destruirlo; podemos experimentar con el corazón muerto como modelo del vivo, o incluso aplicar conceptos puramente de ingeniería, de bomba y de flujo hidráulico (como el propio Harvey había comenzado a hacer). Los experimentos cuantitativos con organismos excluyendo los conceptos de «vida» o «fuerza vital» no carecían de valor, como tampoco carecían de él las analogías entre inorgánico y orgánico que el método del «modelo» hacía posibles. Según los principios cartesianos, había que suponer que lo que se observaba en un órgano o tejido en el laboratorio existiría también en todo el cuerpo vivo y que los resultados concretos que se obtenían con ciertos procesos experimentales al observar el espécimen vivo debían de ser fruto de procesos similares en la propia organización de éste. El axioma básico de la ciencia experimental es que, si las circunstancias no cambian, tal causa producirá tal resultado porque la «causa» pone en marcha una serie de acontecimientos que siguen una pauta invariable. Si no es así, entonces no es útil aplicar el método de investigación experimental al problema. El descubrimiento (racional, no empírico) de Descartes fue que así ocurriría en los fenómenos fisiológicos; cabía dar por hecho, a primera vista, que las circunstancias (por ejemplo, entre el cuerpo vivo y la vasija del químico) permanecían invariables y que, dado que las funciones eran automotrices, tal resultado era punto de tal causa.

Así, el mismo mensaje —que el organismo vivo no está por encima del análisis— lo transmitieron dos filósofos de la naturaleza tan dispares como William Harvey y René Descartes. Los escritos científicos de Descartes sugerían, más incluso que los de Harvey, multitud de investigaciones de procesos fisiológicos. Su influencia es detectable en la evolución de la anatomía comparada (sobre todo en Francia y Holanda) y todavía más en el perfeccionamiento de los estudios neuromusculares que llevaron a cabo Borelli, Thomas Willis, Sylvius,

Nils Steno y otros. Aún más eficaz fue el estudio experimental de la respiración, cuyo resultado fue la ampliación teórica de la antigua analogía con la combustión. Entre la Accademia del Cimento (1657-1667) de Florencia y Robert Boyle, ya avanzado el siglo XVIII, una serie de investigadores examinaron qué les ocurría a los animales pequeños al ser encerrados en volúmenes reducidos de aire, en «fluidos elásticos» (gases) o en un vacío parcial. Se observó que en el vacío era imposible tanto la combustión como la respiración y que el animal no tardaba en morir; también se observó que algunos «fluidos» semejantes al aire eran igualmente nocivos. El médico inglés John Mayow (1641-1679) insistió en que sólo una *parte* del aire era esencial para la vida o la combustión y que se agotaba al colocar un animal o una llama en una vasija cerrada sobre el agua; porque el nivel del agua subía en la vasija y el aire residual era inerte e inútil. A partir de una combinación de ideas anteriores, Mayow arguyó que para la vida y la combustión era esencial que en la atmósfera hubiera un espíritu «nitro-aéreo». (Entre otras pruebas había esta: historia persistente: cuando el inventor holandés Cornelius Drebbel hizo navegar su submarino en las profundidades del Támesis, ante los asombrados ojos de Jacobo I y sus cortesanos, había revivificado el aire reducido con nitro.) De modo más mecánico, Robert Hooke demostró (1667) que era posible mantener vivo un perro si se le metía aire en los pulmones con un fuelle, incluso después de extirparle las costillas y el diafragma. De este experimento (que nunca más quiso repetir) sacó la conclusión de que el animal «estaba preparado para morir si no se le suministraba aire o si el aire con que se le llenaban los pulmones era siempre el mismo; y de ello deduje que la función verdadera de la respiración era expulsar los humos de la sangre». Otros miembros de la Royal Society se convencieron, por medio de experimentos, de que «la sangre del feto en el útero se ventila con la ayuda de la madre»; y de que la circulación fetal dependía directamente de la materna.

Durante un tiempo, como dan a entender las palabras de Hooke, hubo dudas sobre si la presencia de aire fresco en los pulmones era necesaria para extraer algo de la sangre (los «desperdicios fuliginosos» de la fisiología de Galeno) o para añadirle algo. Sobre este punto arrojaron nueva luz las investigaciones de Richard Lower (1631-1691), médico y fisiólogo experimental además de teórico. En su *Tratado sobre el corazón* (1669), la más distinguida de las sucesoras

de la obra maestra de Harvey en el siglo XVII, Lower defendió y amplió la forma original, precartesiana de la teoría: los latidos del corazón no los causaba una fermentación de la sangre, sino un aferente de espíritus que procedía de los nervios, y, si se seccionaban éstos, la pulsación cesaba. La sangre y no el corazón era la fuente de calor, así como de la actividad y la vida de los cuerpos; en esto parece que Lower, más claramente que Descartes o Harvey, ve el corazón como una bomba mecánica y nada más. Tampoco tiene el corazón nada que ver con el cambio de color de la sangre arterial, pues este cambio puede producirse forzando el paso de sangre por los pulmones insuflados de un perro muerto, o incluso agitando sangre venosa en el aire:

> ... que este color rojo se debe enteramente a la penetración de partículas de aire en la sangre está bien claro porque, mientras que la sangre se tiñe de rojo en toda su masa en los pulmones (debido a que el aire difunde por todos ellos las partículas de sangre y de aquí que se mezcle más completamente con la sangre).

la sangre venosa en una vasija sólo se vuelve roja en la superficie. Lower sacó la conclusión de que el factor activo de esta transformación de la sangre era cierto «espíritu nitroso» (denominado en otras partes «alimento nitroso») que la sangre recogía en los pulmones y descargaba «dentro del cuerpo y la parénquima de la víscera» para que saliese por los poros, dejando que la sangre venosa, oscura y empobrecida, volviera al corazón. Por lo tanto, la respiración era un proceso cuya función consistía en añadir algo a la sangre (según Lower, si el «aire viciado» causa enfermedad, tiene que haber comunicación entre la atmósfera y el torrente circulatorio); sin embargo, para comprender mejor la naturaleza de esta añadidura hubo que esperar a la revolución química del siglo XVIII.[18]

Los nuevos conceptos de la sangre como fluido «mecánico», vehículo que transportaba sustancias alimenticias, componentes del aire y calor de un lado a otro del cuerpo, inspiraron una nueva técnica terapéutica: la transfusión de sangre, cuyo precursor fue también Lower. La sangre aún era considerada como una sustancia semimágica y, como se creía que la sangre «mala» podía causar debilidad,

18. Richard Lower, *Tractatus de corde* (1669), trad. inglesa de K. J. Franklin en R. T. Gunther, *Early science in Oxford*, IX, Oxford, 1932, especialmente pp. 164-171

frenesí o enfermedad crónica, era lógico suponer que si la sangre de un paciente humano podía sustituirse con la de un animal sano, forzosamente se produciría una mejoría. Un italiano que afirmaba ser el inventor del método de transfusión (aun reconociendo que nunca lo había intentado) incluso afirmó que dicho método permitiría un rejuvenecimiento que sería la prerrogativa de los monarcas y de nadie más. Christopher Wren (1632-1723), cuando estudiaba en Oxford, experimentó con la inyección de fluidos en las venas de animales; a causa de ello, según Sprat, los animales eran «inmediatamente purgados, vomitados, intoxicados, muertos o reanimados según la índole del Licor inyectado».[19] En 1665 varios miembros de la Royal Society pidieron que se efectuaran transfusiones de sangre entre animales e incluso se hicieron varios intentos en tal sentido; Lower investigó el asunto a fondo y logró reanimar un perro al que se había sangrado hasta dejarlo al borde de la muerte. Finalmente, en 1667, Lower llevó a cabo ante la Royal Society la transfusión de la sangre de una oveja a cierto «pobre y licencioso hombre... que estaba un poco chiflado». Por suerte el paciente salió vivo del experimento sin que se produjera ningún cambio en su estado. Este experimento lo había hecho antes que Lower el médico francés Jean Denys, que poco después causaría la muerte de un paciente; en vista de ello las transfusiones fueron prohibidas en Francia a la vez que en Inglaterra cesaban los experimentos. Varias crónicas de la época describen las reacciones violentas producidas por la introducción de proteína animal en el torrente circulatorio humano, la cual produce la muerte rápidamente, y sin duda gran parte del éxito aparente de estos primeros experimentos cabe atribuirlo a que la sangre se coaguló en los tubos, permitiendo sólo el paso de una pequeña cantidad. Los experimentos con las transfusiones no se reanudaron hasta el siglo XIX, momento en que se dejó de utilizar sangre animal.[20]

Mientras que un aspecto importante de la expansión de la biología experimental del siglo XVII fue el estudio mecánico y bioquímico de la sangre, cuyas funciones ocupaban un lugar muy destacado en las teorías terapéuticas de la época, otro aspecto no menos destacado fue el papel del misterio esencial de la «vida», objeto de exploracio-

19. T. Sprat, *History of the Royal Society*, Londres, 1723[3], p. 317.
20. Véanse A. R. y M. B. Hall, *The correspondence of Henry Oldenburg*, IV, Madison, Milwaukee y Londres, 1967, y *eidem* en *Medical History*, 24 (1980), pp. 461-465.

nes más directas. Se trataba de investigar la generación y la evolución embrionaria de los seres vivos, incluyendo el hombre. Del mismo modo que el interés por el movimiento y las funciones de la sangre tuvo su origen en la prominencia que se les daba en la teoría galénica de los humores, estas investigaciones embriológicas se remontan sin interrupción a la obra de Aristóteles. Fabrizi d'Acquapendente, autor de los primeros estudios importantes de la reproducción y la embriología en la era moderna (1604, 1621), era, por supuesto, seguidor en gran medida de Aristóteles como única autoridad en la materia, aunque había aportado sus propios descubrimientos e ideas nuevas (por ejemplo, creía, al parecer, que en el embrión la sangre se forma *antes* que el corazón) y a veces, como en el caso de su propio tratamiento de la circulación fetal en los mamíferos, seguía a Galeno. También Harvey, como hemos visto, era muy fiel a Aristóteles, si bien en una cuestión importante le contradecía por completo (en esto se le anticipó parcialmente Fabrizi), pues era escéptico en lo referente a la «generación espontánea» y, aunque no la inventase él, la frase *omne vivum ex ovo* es el epítome de su pensamiento. El descrédito parcial de la generación espontánea (no total, ya que la idea resucitaría en el siglo XVIII, momento en que fue refutada experimentalmente por Spallanzani, y de nuevo en el siglo XIX, en oposición a Pasteur) fue uno de los cambios más importantes que tuvieron lugar en el pensamiento biológico de la época; un primer paso hacia conceptos modernos de la materia de la materia viviente. Anteriormente, todas las cosas vivas se dividían en cuatro grandes grupos: 1) las generadas de modo espontáneo a partir de materia muerta, generalmente en estado de putrefacción; 2) las plantas; 3) los animales; 4) el hombre. Como hemos visto, las tres últimas clases se distinguían según sus «almas», que correspondían a sus capacidades observadas (respectivamente en orden aditivo superior) para la nutrición y la reproducción, la locomoción y la sensación, y el pensamiento racional. El grupo de generación espontánea, que estaba a caballo entre lo muerto y lo vivo, al que se asignaban los insectos, los gusanos, los parásitos de toda clase y las plantas sin flores, y al que la ignorancia de siglos posteriores añadió incluso las abejas, las ranas, los ratones y los percebes, no fue objeto de más clasificaciones, aunque el parecido de algunos de sus miembros con animales, así como de los hongos y las algas con las plantas, hubiera podido llevar a tal división, y ninguno, al decir de la gente culta (contradiciendo la experiencia más obvia de, por ejemplo, los

hongos comestibles y no comestibles), mantenía su continuidad específica. Naturalmente, toda la doctrina de la generación espontánea nacía de algún ordenamiento antiguo y primitivo de la vida no humana, sin que ni siquiera Aristóteles (aunque lo sancionó y se esforzó por darle coherencia filosófica) pudiese eliminar de él las contradicciones: pues, ¿cómo es posible calificar de *vivientes* a los seres de un grupo tan misceláneo, pero, al mismo tiempo, negarles todos los atributos de las cosas vivas? ¿Por qué asignarle una historia natural a la abeja (como hace Aristóteles, que la estudia escrupulosamente) y negársele a la avispa? Prescindiendo incluso de las supersticiones y las fábulas que más adelante se refugiarían en la idea de la generación espontánea, ésta debe considerarse como uno de los elementos más falsos e irracionales de la visión de la naturaleza heredada de la antigüedad.

Es cierto que en *Sobre el movimiento del corazón* Harvey escribió que esta víscera no se encuentra «como parte distinta y separada en todos los animales; algunos, tales como los zoófitos, no tienen corazón», y continuó, «Puedo citar como ejemplo los gusanos y las lombrices de tierra, y los que engendra la putrefacción y no preservan su especie». Si ésta no fue meramente una frase escrita al descuido, Harvey cambió de opinión, pues en su obra posterior *Sobre la generación de animales* (1651), declaró:

> ... muchos animales, especialmente insectos, nacen y se propagan a partir de elementos y simientes tan pequeños que son invisibles (como átomos volando en el aire), esparcidos y dispersos aquí y allá por los vientos; y, pese a ello, se supone que estos animales han nacido espontáneamente, o de la descomposición, porque sus huevos no se ven en ninguna parte.[21]

Para que a esta afirmación se le pudieran dar una fuerza y un significado verdaderos, fue necesario que las artes de la observación natural, de la anatomía comparada y de la experimentación biológica sencilla y controlada se perfeccionasen hasta alcanzar el mismo nivel que en la Grecia antigua. En muchos aspectos, los conocimientos biológicos de Aristóteles eran muy superiores a los existentes en el siglo XVI; de hecho, algunas de sus observaciones no se verificarían hasta el siglo XIX. Es asombroso comprobar, por ejemplo, que su

21. Robert Willis, *Works of W. Harvey*, Londres, 1857, p. 321.

observación sensata y penetrante del proceso de reproducción de las abejas —que en sí misma no era del todo correcta— fue objeto de desatención universal hasta la época moderna, mientras que se daba crédito a cuentos fabulosos sobre su generación en la carne de un ternero o un león muerto. Además de aparecer en las obras de muchos poetas romanos, así como de autores que escribían sobre agricultura, estos cuentos los repitieron en el siglo XVI y después naturalistas como Aldrovandi, Mouffet y Johnson, así como los filósofos Cardan y Gassendi. Incluso el ciclo vital de la rana, que era relativamente sencillo, era un misterio, al menos para los naturalistas académicos.

Harvey había conjeturado que en algunos casos la «simiente» invisible de los seres vivos la diseminaba el viento. Quien se propuso refutar sistemáticamente la falacia generalizada de la generación espontánea fue Francisco Redi (1626-1678), médico italiano que trabajaba en Florencia bajo el patronazgo del duque de Toscana y era miembro importante de la Accademia del Cimento. Sus observaciones y experimentos fueron variados y numerosos, pero los más reveladores fueron los más sencillos. Así pudo probar, empleando el medio más simple, que la carne en putrefacción sólo generaba «gusanos» cuando se permitía que las moscas se posaran en ella; que las larvas se convertían en crisálidas (que él denominaba «huevos») de las que salían moscas del mismo género; y que las moscas adultas que infestaban la materia putrefacta poseían ovarios o conductos dentro de los cuales había centenares de huevos. Generalizando a partir de tales resultados, Redi declaró que todos los tipos de plantas y animales nacen exclusivamente de las verdaderas simientes de otras plantas y otros animales del mismo género, preservando así su especie. La materia putrescente servía sólo como nido para los huevos y como nutrimento de las larvas que salían de ellos. Sin embargo, tuvo que reconocer que había algunos ejemplos de generación que él no podía explicar. Los gusanos intestinales y otros parásitos le desconcertaban y no logró descubrir la causa de las agallas que crecen en los árboles, causa que fue descubierta más adelante por Malpighi. Esto llevó a Redi a especular de forma un tanto vaga sobre posibles perversiones de la «fuerza vital» de los organismos huéspedes capaces de producir tumores parasitarios.

A pesar de ser incompletas en lo que respecta a la lógica y los datos —pues, ciertamente, no probó que la generación espontánea nunca se produjera en la naturaleza ni que fuese imposible que se

produjera—, por regla general las demostraciones de Redi se consideraron convincentes. Se ajustaban al espíritu de la época, un espíritu más exacto y ontológicamente más rígido, y eran corroborados por los esmerados estudios de otros naturalistas como Malphigi y Swammerdam. Que el fruto de la muerte y la putrefacción fuera capaz de dar vida espontáneamente podía ser muy aceptable para otras filosofías, pero no constituía una idea plausible para los cristianos y los cartesianos: si Dios había poblado el mundo de cosas vivientes, su creación no podía ser indeterminada, confusa, y (si la vida era sencillamente una forma muy organizada de movimiento) tampoco esta organización podía aparecer sin causa ni antecedente. La tendencia general del pensamiento del siglo XVII, en lo que atañe a la materia viviente, era distinguir a ésta tajantemente de la materia inerte; de hecho, consistía en confinar lo vivo dentro de las secuencias inmutables de la descendencia de cada especie. Los nuevos descubrimientos —de los huevos de mamíferos de De Graaf o los espermatozoos de Leeuwenhoek— sólo sirvieron para poner de relieve los mecanismos escrupulosos y universales que establecían y salvaguardaban las citadas líneas de descendencia. Dado que, para el cristiano no era ningún problema atribuir el origen de la vida a una creación especial y como, además, creía también que el mundo creado de nuevo era idéntico al mundo conocido de su propio tiempo —exceptuando el desgaste, por así decirlo, causado por unos cuantos milenios—, la consecuencia necesaria de ello parecía ser, por un lado, la inmutabilidad de las formas vivas y, por el otro, la no proliferación de las mismas. Pocos suponían que el poder *creativo* de Dios se hubiera extendido más allá del sexto día del universo y que con eso la facultad generadora de vida nueva que poseía la materia hubiera cesado para siempre.

Además, la segunda mitad del siglo XVII fue un período en el que, debido en parte a la anatomía animal y vegetal, en parte a la utilización del microscopio y en parte también a los experimentos, se aclararon muchos misterios relativos a los procesos de reproducción menos obvios. La sexualidad de las plantas, que Nehemiah Grew fue el primero en defender, se confirmó con los experimentos de Camerarius antes de 1694. Pero aunque la tendencia general era a excluir la pangénesis, los experimentalistas no querían apresurarse a hacer una interpretación puramente mecanicista. Las especulaciones embriológicas de Gassendi y Descartes encontraron escaso eco. Harvey había escrito que «adopta la correcta y pía visión del asunto

según la cual toda generación procede de la misma Deidad eterna y omnipotente, de cuyo asentimiento depende el universo mismo... ya se trate de Dios, de la Naturaleza o del Alma del universo»; sin embargo, esto no le impidió estudiar los fenómenos con toda la atención. De modo parecido, John Ray, en *La sabiduría de Dios* (1693), relacionaba su análisis de la falacia de la generación espontánea con la naturaleza de la especie, una naturaleza fija, creada. El mundo de Ray era una máquina en el sentido de que él dudaba que, una vez terminada la creación en el sexto día, la divinidad hubiera instituido nuevas especies (o dotado a la materia de vida *de novo*); para él la vida sólo podía transmitirse por medio de las generaciones recurrentes surgidas de los antepasados primigenios; dado que se vería restringida a todo el grupo de seres existentes en un momento dado, la facultad de vivir no podía nacer de ninguna conjunción de circunstancias puramente mecánicas.

Pese a las limitaciones de la perspectiva filosófica que negaba a muchos naturalistas experimentados, y a Harvey en particular, toda visión de las potencialidades esenciales de las especulaciones fisicoquímicas de la época, que sin duda eran toscas, la historia de la embriología nos ofrece un ejemplo útil de la aplicación crítica de la observación y los experimentos al estudio de conceptos científicos de orden complejo. Ello era posible por diversas razones, las cuales señalan algunas analogías significativas entre el estado de esta ciencia y el de las ciencias físicas que tantos progresos hacían. Para esta rama de la biología era importante que existieran ideas que pudiesen criticarse o confirmarse, problemas que exigieran investigación; esta importancia era mucho más obvia que en los terrenos puramente descriptivos. ¿Cuáles eran las aportaciones respectivas del padre y de la madre a sus vástagos? Las partes ¿«se formaban» o simplemente «crecían»? ¿Cuál era la función del líquido amniótico, o de la circulación fetal? ¿Cómo se nutría el embrión o cómo podía respirar? En su explicación sistemática Aristóteles había intentado dar respuesta a estas preguntas; la exactitud de su observación biológica y la agudeza de su razonamiento biológico fueron objeto de examen en los siglos XVI y XVII, examen que no fue menos concienzudo que el relativo a sus doctrinas de las ciencias físicas. Del mismo modo que Galileo había esgrimido el método de Arquímedes contra Aristóteles, Harvey y Redi se valieron de los métodos de observación de Aristóteles para combatir las conclusiones de Aristóteles como teóri-

co. En embriología era tradicional dirigir la atención hacia los puntos críticos, una tradición tan real como la que existía en cosmología o mecánica. Por supuesto, las ganancias estratégicas eran mucho más escasas —no hubo ninguna revolución copernicana en embriología, ningún cambio de ideas tan importante y permanente como el de Harvey relativo al corazón—, pero los avances tácticos en método y análisis fueron no menos reales. En la ciencia los pasos conceptuales y metodológicos hacia adelante no se dan necesariamente al mismo tiempo y a veces un largo período de evolución cumulativa, poco espectacular, puede ser el preludio esencial de un importante cambio de ideas, de la apertura de una nueva puerta. Con ser brillantes los destellos de percepción biológica que iluminaron este período, los problemas de la biología eran demasiado numerosos y demasiado complejos para permitir la formulación de una estructura interpretativa que fuera exhaustiva y estable; hasta el siglo XIX no se eliminaron gradualmente muchos factores limitadores de índole técnica y conceptual. No menos cierto fue esto en el caso del microscopio, ese instrumento maravilloso, esencial pero engañoso del biólogo, cuya historia y efectos comentaremos en otro capítulo.

CAPÍTULO 7

NUEVOS SISTEMAS DE PENSAMIENTO CIENTÍFICO EN EL SIGLO XVII

No hay duda de que a causa del telescopio del tiempo la historia intelectual de la Edad Media parece más monolítica de lo que fue en realidad. Además de los cismas teológicos que produjeron matanzas sangrientas como la cruzada albigense, además de la tensión omnipresente entre el cristianismo y el islam, hubo disputas menos violentas entre realistas y nominalistas, entre los dominicos y franciscanos, entre los aristotélicos literalmente fieles y los innovadores como, por ejemplo, los partidarios de Averroes o la escuela matemática de Oxford. Pero, al menos en lo referente a la filosofía de la naturaleza, el historiador se inclina a pensar que en las postrimerías del siglo XVI se disolvió un consenso esencialmente aristotélico y fue reemplazado, no por una, sino por multitud de escuelas: atomistas, cartesianos, herméticos y paracelsistas, helmontianos, platónicos y matemáticos pitagóricos, eclécticos e individualistas de muchos tipos. En las escuelas y las universidades seguían enseñándose la lógica y la ética aristotélica; de hecho, la filosofía natural de Aristóteles, al igual que los textos médicos de Galeno, era aún muy leída como parte del curso normal de estudio, ya fosilizado en el sistema de enseñanza; sin embargo, semejantes textos habían perdido toda su fuerza intelectual creativa, de modo que a mediados del siglo XVII los esfuerzos independientes de jóvenes como Christiaan Huygens, Robert Boyle o Isaac Newton no partieron de un terreno tan trillado y polvoriento, sino de los libros de los recientes filósofos matemáticos, mecánicos y químicos. Las primeras clases públicas de filosofía natural moderna, con demostraciones experimentales, se dieron en la

Universidad de Utrecht en 1672, es decir, una generación después de los primeros análisis que allí se hicieron de la filosofía de Descartes; de forma más modesta, también en las actividades académicas de otras universidades empezaron a colarse temas de debate cuyo origen estaba en textos modernos y no en los textos consagrados por el tiempo.

De entre todos los modernos, René Descartes fue el que más se acercó al derecho de llevar el manto robado de Aristóteles, ya que se le leía universalmente y tenía numerosos seguidores. Descartes creó un fundamento metafísico, una epistemología y un sistema completo de la naturaleza que abarcaba la explicación de todos los fenómenos. Prometió un método infalible de descubrimiento. Su reputación aumentó gracias a la labor de hábiles y pacientes expositores, en especial de Jacques Rohault (1620-1673), y cuando empezaron a hacerse notorios los defectos de sus propias explicaciones de los fenómenos naturales, su sistema cobró nueva vida gracias a los escritos de «neocartesianos» extremadamente competentes, entre los que destacan Huygens, Malebranche y Leibniz. De hecho, a pesar de la poderosa influencia contraria de Newton, la luz que arrojara Descartes se extendería hasta penetrar en el resplandor más general de la Ilustración del siglo XVIII y de su principal monumento, la *Enciclopedia* de Diderot y D'Alembert. Por otra parte, Descartes era un matemático puro genial que también hizo trabajos de valor imperecedero en el campo de la física matemática; de no haber sido filósofo, igualmente ocuparía un lugar destacado en la historia de la ciencia. En todos los aspectos menos en uno, la investigación experimental sistemática, Descartes sobresalía en el momento de su muerte, y después de ésta sería, para todos quienes en aquel momento eran capaces de comprender sus libros, la gran luminaria, el hombre que había abierto un camino ancho para la posteridad.

Uno de los que más se acercaron a Descartes por su tipo, aunque no por la fuerza de su influencia, fue su compatriota y casi contemporáneo Pierre Bassendi (1592-1655), cofundador de lo que Boyle denominaría la «filosofía mecanicista». Tanto en su calidad de filósofo puro como en la de «científico» puro, los logros de Gassendi fueron de categoría inferior a los de Descartes, pero nadie antes de estos dos franceses reunió la filosofía y la ciencia de una manera íntegra. Galileo, por ejemplo, era un excelente filósofo de la naturaleza, pero, de no ser por esto, no tendría ningún lugar en la historia de la filoso-

fía general. Según Stillman Drake, Galileo no podía sufrir la filosofía retórica convencional, como les ocurriría también a muchos de sus sucesores. («Las preguntas que hacen los filósofos o bien no pueden contestarse o se contestan mejor por medios otros que el comentario verbal».)[1] Ciertamente, Galileo hacía todo lo posible para evitar la metafísica y desconfiaba de todos los sistemas de pensamiento universales. Le interesaban principalmente —incluso en defensa del universo copernicano— las cuestiones científicas y el análisis de problemas específicos. No construyó una filosofía metódica de la ciencia, aunque de sus obras pueden extraerse los elementos de la misma. Por otro lado, se le puede calificar apropiadamente de epistemólogo, pues su reflexión consciente sobre las obstrucciones que deben superarse para obtener una comprensión clara y confiada de la naturaleza es explícita en cierto número de pasajes y condiciona implícitamente la revolución de las ideas que él llevó a cabo. Al igual que otros críticos importantes de Aristóteles, Galileo se encontró ante dos problemas ineludibles: ¿sobre qué cimientos debía edificarse la estructura intelectual de la ciencia? y ¿qué criterios sobre lo que era una explicación satisfactoria debían reemplazar a los de Aristóteles? En el caso de Galileo a estas preguntas no se les contestó con prolongados análisis metafísicos o lógicos —aunque sin duda en sus ideas influyeron los análisis de esta índole realizados por sus predecesores—, sino que las respuestas llegaron a medida que se hicieron necesarias en el curso de su ataque contra la idea imperante de la naturaleza. Como científico el objetivo de Galileo podía ser detectar los errores de hecho o de razón de Aristóteles, mientras que como filósofo demostró de manera más fundamental cómo tales errores habían surgido de la debilidad del método, una debilidad que podía evitarse siguiendo un rumbo distinto. A juicio de Galileo, la exposición negativa, por medio de experimentos o mediciones, de una equivocación aislada no constituía el único avance de que era capaz la nueva filosofía.

Los dos tratados principales de Galileo son polémicos. No dicen de qué modo se sacaron ciertas conclusiones, sino que en vez de ello procuran demostrar que estas conclusiones son indudablemente ciertas. Por consiguiente, sus argumentos son sintéticos y la textura del razonamiento y la experiencia está tan entretejida que ésta parece no

1. Stillman Drake, *Galileo against the philosophers*, Zeitlin and Ver Brugge, Los Angeles, 1976.

tanto un gancho del que cuelga una deducción como un testigo ocular de su validez. Se da el caso universal de que los métodos que se emplean para hacer un descubrimiento y los que se usan para exponerlo difieren, en grados variables, y Galileo raras veces utilizaba la técnica directa consistente en dar cuenta e inferir, técnica que más adelante gozaría de gran favor entre los empíricos ingleses. Ahora sabemos, gracias al detenido análisis de Stillman Drake de las notas desordenadas e inéditas de Galileo,[2] que los experimentos cuantitativos desempeñaron un papel esencial en la generación de su teoría matemática del movimiento y que deberíamos sentirnos inclinados a confiar en Galileo cuando da cuenta de determinados experimentos (como los que hizo con los cuerpos flotantes, por ejemplo); sin embargo, la exposición galileana ocultaba mucho trabajo paciente y objetivo, cosa que ocurre también en la astronomía. Tanto en el *Diálogo* como en las *Consideraciones* más bien se demuestra que las bases del conocimiento científico son fenómenos y axiomas. Por su atención a fenómenos reales la ciencia de Galileo se hizo real y fundada en la experiencia; por su utilización de la capacidad de la mente para aprehender verdades axiomáticas, su lógica se hizo análoga a la de las matemáticas. De hecho, éstas se generalizaron a partir de aquéllas, pero el proceso podía llevar aparejados elementos históricos además de filosóficos. Así, un axioma fundamental del *Diálogo* es que los cuerpos celestes participan en un movimiento circular uniforme, mientras que en las *Consideraciones y demostraciones* se deducen sucesivas proposiciones en el campo de la dinámica partiendo de la definición axiomática de la aceleración uniforme. Tales axiomas, ilustrados y confirmados por medio de experimentos, se convierten en el punto de partida de argumentos que sirven para exponer sus consecuencias (a la manera de la geometría de Euclides y la estática de Arquímedes) y que son a su vez verificados por la experiencia o aplicados a problemas específicos, tales como el isocronismo del péndulo.

Así, pues, revisten interés especial los comentarios de Galileo sobre el procedimiento necesario para llegar a estas generalizaciones principales. El paso más importante es el de la abstracción. Las generalizaciones esenciales no deben tomarse como el producto final del examen lógico de una idea, a la manera de Aristóteles, pero se obtie-

2. *Idem*, *Galileo's notes on motion*, Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florencia, monografía n.º 3, 1979.

nen abstrayéndolo todo salvo el elemento universal de un fenómeno o clase determinados. Hasta aquí Galileo coincide con Bacon, aunque no ofrecía ninguna serie comparable de reglas lógicas para efectuar esta operación. Sin embargo, a continuación insistió mucho en que por medio de la abstracción se aprende que las propiedades reales de los cuerpos son puramente físicas, esto es, tamaño, forma, movimiento, propincuidad, etc., pero no el color, el sabor o el olor, de modo que, según manifestó en el *Saggiatore*, los «accidentes, afectos y cualidades» atribuidos a ellos no son en absoluto inherentes a los cuerpos, sino que son nombres que se dan a sensaciones que estimula en el observador la constitución física de lo que él percibe. Galileo observó que el hecho de no proceder por abstracción desde las sensaciones hasta la realidad física subyacente había ocasionado mucha confusión en el estudio del calor; considerado físicamente (dice él), no hay ningún misterio en el calor, que no es más que un nombre que se aplica a una sensación producida por el movimiento de multitud de pequeños corpúsculos que tienen cierta forma y cierta velocidad y cuya penetración en la sustancia del cuerpo humano despierta la citada sensación. En estas opiniones es evidente la influencia del atomismo epicúreo; cabría decir que todo este enfoque de la cuestión de las cualidades primarias y secundarias lo determina un concepto mecanicista de la composición de la materia. La explicación de un problema científico empieza de verdad cuando se reduce a sus términos básicos de materia y movimiento: la transformación que siguió siendo el ideal de la física clásica. El nombre *calor* no podría ser una causa, puesto que, como señaló Galileo, no hay nada entre, por un lado, las propiedades físicas de los cuerpos con los movimientos y tamaños variables de sus partículas componentes y, por otro, la percepción subjetiva del observador. En la ciencia tradicional halló otros ejemplos de esta tendencia a creer que las cuestiones podían explicarse mediante juegos malabares con nombres abstractos: por ejemplo, cuando en el *Diálogo* se define la gravedad sólo como el nombre de lo que ocasiona la caída de los cuerpos pesados; dar nombre no ayuda a comprender. El mundo de la mecánica galileana era, de hecho, el espacio geométrico euclidiano en el cual se mueven cuerpos dotados de peso y *momentum*. En opinión de Galileo, el secreto de la ciencia oficial —siendo el descubrimiento un proceso privado y no oficial, por así decirlo— consistía en transferir un problema, debidamente definido, a este mundo abstracto de la ciencia que, al añadír-

sele a su vez elementos de creciente complejidad, podía aproximarse más y más al universo fundado en la experiencia. Así era también, aunque con una exactitud todavía mayor en el proceso de aproximación, el método de Newton.[3]

Las raíces de esta ciencia axiomática, matemática, eran, desde luego, tan griegas como la física aristotélica. El precedente antiguo más claro se encuentra en los libros sobre óptica cuyos autores habían identificado los rayos de luz rectilíneos con líneas rectas geométricas y los espejos reflectantes con superficies matemáticas; de modo parecido, Arquímedes había edificado la estática y la hidrostática con el menor número posible de axiomas físicos relativos al equilibrio y la definición de un fluido. En una ciencia tan axiomática el curso de un argumento era tan impecable como la geometría que lo regía, y era de la incumbencia de quien usara el argumento, por así decirlo, determinar en qué medida los cuerpos reales sumergidos en agua, por ejemplo, se comportaban de modo parecido a los cuerpos axiomáticos sumergidos en el fluido axiomático de Arquímedes. Sin embargo, era notable el hecho de que los antiguos, incluyendo al propio Arquímedes, no habían logrado hacer extensiva la misma pauta filosófica al movimiento, y ningún matemático antiguo habría declarado que el método axiomático era el único que debía emplearse para estudiar el movimiento, el cambio y todos los problemas de la ciencia física. Ni siquiera Galileo van tan lejos, sino que más bien asevera que el método matemático debería preferirse a todos los demás, por ser el único que ofrece certeza. Cuando se ha planteado un problema de forma matemática y se ha llegado a determinada conclusión, ésta tiene que ser cierta si el problema estaba formulado correctamente y se habían dado los pasos matemáticos correctos. En tal caso, el rigor lógico del argumento viene garantizado por su forma matemática, mientras que su veracidad contingente o conformidad con la experiencia depende de la elección de los axiomas, a los que tal vez habrá que determinar como el resultado de la investigación experimental, y debe confirmarse o refutarse mediante más experimentos. Galileo sabía muy bien lo engañosos que pueden ser los experimentos y las observaciones, a menos que se interpreten en una matriz teórica adecuada.

3. I. Bernard Cohen, *The Newtonian revolution*, Cambridge U. P., Cambridge, 1980. (Hay traducción castellana: *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, Alianza Editorial, Madrid, 1983.)

Sin embargo, arguyó que este método no abandonaba la realidad del mundo físico, toda vez que para Galileo el libro de la naturaleza estaba «escrito en lenguaje matemático... siendo las letras triángulos, círculos y otras figuras sin las cuales es humanamente imposible comprender una sola palabra».[4] La arquitectura del mundo real no era menos geométrica que la del espacio abstracto de Euclides. Tampoco había distinción alguna entre «verdad real» y verdad matemática. Si los esfuerzos por matematizar la naturaleza fracasan, ello se debe solamente a que la tarea no se ha emprendido del modo apropiado. Un plano físico no es un plano geométrico, de hecho, pero sus desviaciones de la lisura geométrica pueden a su vez expresarse en matemáticas. Se trata sencillamente de poseer la habilidad necesaria para desplegar las sucesivas capas de complejidad matemática que hay en la naturaleza. Razonando así, a Galileo se le ha llamado platónico porque buscaba el ideal matemático en la naturaleza; pero Galileo percibió también que, si bien la lógica matemática es infalible, cabe que se apoye en suposiciones falsas, como las del sistema ptolemaico, las cuales, aunque pueden satisfacer a un astrónomo meramente matemático, no podrían hacer lo mismo en el caso de un astrónomo filosófico.

En virtud del método de abstracción, asimismo, el concepto científico de las «leyes de la naturaleza» se ajustaba de un modo sencillo y pulcro. Este concepto, que desconocían tanto el mundo antiguo como los pueblos del Extremo Oriente, parece ser que nació de una peculiar interacción entre las ideas religiosas, filosóficas y legalistas del mundo europeo de la Edad Media. Aparentemente está relacionado con el concepto de la ley natural en el sentido social y moral conocida por los juristas medievales y significa una notable desviación de la actitud griega ante la naturaleza. El empleo de la palabra «ley» en semejantes contextos habría resultado ininteligible en la antigüedad, mientras que la creencia hebraica y cristiana en una deidad que era a la vez Creador y Legislador la hacía válida. La existencia de leyes de la naturaleza era una consecuencia necesaria del designio en ella, ya que, de no ser por tales leyes, ¿cómo podría perpetuarse la integridad del designio? Sólo el hombre gozaba de libre albedrío, la facultad de transgredir las leyes que debía observar; a los planetas no se

4. Galileo, *Il saggiatore*, 1623; Stillman Drake, *Discoveries and opinions of Galileo*, Doubleday, Nueva York, 1957, pp. 237-238 (*The Assayer*).

les había otorgado la facultad de desviarse de sus órbitas. De aquí que la regularidad de los movimientos planetarios, por ejemplo, que Aristóteles atribuyó a la vigilancia de unas inteligencias, pudiera explicarse como obediencia a los decretos divinos. El Creador había dotado la materia, las plantas y los animales de ciertas propiedades y características inalterables, y las más universales de éstas constituían las leyes de la naturaleza, discernibles por la razón humana. Es obvio que este concepto puede ir asociado a una filosofía mecanicista y que es incompatible con el animismo; tal como dijo Boyle:

> Dios estableció esas reglas del movimiento y ese orden entre las cosas corpóreas que denominamos leyes de la naturaleza. [Así] siendo el universo obra de Dios, y establecidas las leyes del movimiento, y todo sostenido por su concurso y su providencia incesante, la filosofía mecanicista enseña que los fenómenos del mundo son producidos físicamente por las propiedades mecánicas de las partes de la materia.[5]

Aunque a las leyes de la naturaleza se les conceda esta categoría trascendental —de tal modo que podamos preguntar qué son, pero no por qué son válidas—, aún cabe preguntarse lo siguiente: «¿Cómo puede reconocerse que una proposición dada es una ley de la naturaleza?». Dicho de otro modo, ¿de qué manera una ley de la naturaleza se diferencia de cualquier otra generalización que casualmente sea verdad porque todavía no se ha encontrado un ejemplo de que no lo sea? Los modernos filósofos de la ciencia, tras quitarles a las leyes de la naturaleza su categoría trascendental, presentan sus propias respuestas a este problema. Galileo y después Newton obtuvieron la respuesta aplicando el método de la abstracción. Al crear por medio de ésta el modelo esencial de los fenómenos del movimiento que él estudiaba, Galileo hizo que la validez pragmática de una generalización contingentemente cierta en el mundo de la experiencia se transformara en la validez absoluta de que disfrutaba un axioma o una definición dentro del modelo teórico. Así, Galileo ofrece (como él dice) una sola definición del movimiento igual o uniforme: «Entiendo que el movimiento igual o uniforme es aquel cuyas partes recorridas por el móvil en cualesquiera períodos iguales son iguales unas a otras»,

5. Robert Boyle, *Of the excellency and grounds of the mechanical hypothesis*, 1674; T. Birch, *Works*, 1772, IV, pp. 67-68 (condensado).

y a esto añade cuatro consecuencias o, como dice él, «axiomas».[6] La definición corresponde a un movimiento que ciertamente podemos concebir como movimiento que ocurre en la naturaleza, pero Galileo no dice en qué cuerpos puede encontrarse; de hecho, a juzgar por lo que vemos a menudo en los escritos de Galileo, parece que él considera el movimiento uniforme natural como algo que sólo tiene lugar en condiciones muy especiales, por no decir imposibles. Luego se elucida las propiedades del movimiento uniforme y resulta claro, por supuesto, que los verdaderos cuerpos móviles poseerán tales propiedades aproximadamente en la medida en que se acerquen al estado de movimiento uniforme. Así, Galileo también puede considerar que el proyectil ideal es poseedor de un componente de movimiento uniforme. Galileo, por lo tanto, no tiene ninguna *ley* del movimiento uniforme aquí; escribir para él una ley definidora de las circunstancias en que puede producirse el movimiento uniforme significaría escribir una larga exposición de condiciones basadas en la experiencia. Newton, sin embargo, pudo abarcar todo esto en tres palabras: *ausencia de fuerza*; luego, por así decirlo, invierte la situación de Galileo enunciando como ley de la naturaleza que todos los cuerpos que se muevan en ausencia de fuerza se mueven uniformemente en línea recta (añadiendo esta última estipulación esencial). Desde luego, para el usuario de la Primera Ley de Newton sigue siendo necesario determinar qué condiciones basadas en la experiencia garantizan la ausencia de fuerza, lo cual, después de describir un círculo completo, nos devuelve a la posición de Galileo. Ni para Galileo ni para Newton es conceptualmente esencial definir con exactitud cuándo se realizan las condiciones de la definición o de la Ley (son irrealizables: sólo un cuerpo único que existiera en el espacio universal vacío podría estar libre de fuerza, toda vez que cualquier otro cuerpo del universo ejerce fuerza en el primero): basta con poder construir una estructura teórica sistémica sabre una Definición o Ley y utilizar esta estructura en (por ejemplo) la investigación del comportamiento de los péndulos o de los proyectiles.

De aquí que las leyes de la naturaleza pudieran considerarse rigurosamente exactas dentro de una estructura teórica fundada en definiciones apropiadas, como en los casos de Galileo y Newton, aun

6. Galileo, *Two new sciences*, trad. de Stillman Drake, Wisconsin University Press, Madison, 1974, pp. 147-148.

cuando las leyes no puedan verificarse nunca (o, para el caso, como diría Karl Popper, falsificarse) con certeza completa en el mundo basado en la experiencia. El fluido perfecto de Arquímedes, el gas perfecto de Boyle y Charles, los puntos-masa sin dimensiones y libres de fuerza de Newton no pueden encontrarse en condiciones experimentales, en parte porque las condiciones nunca pueden realizar ciertos requisitos (por ejemplo, un vacío perfecto), en parte porque todas las sustancias reales son más complejas que estas entidades ideales. Estas limitaciones se hicieron sentir muy pronto en el caso de los experimentos mecánicos pues la compleja geometría galileana del movimiento de los proyectiles sólo la realizan toscamente los proyectiles de verdad que cruzan el aire, el cual opone resistencia a su paso. Aún fue mayor la sorpresa cuando en 1669 Erasmus Bartholin descubrió la birrefringencia en la óptica; desde hacía unos dos mil años los hombres estaban convencidos de que había una sola clase de refracción a la que se veía sujeto un rayo de luz al cruzar la frontera entre dos medios transparentes distintos como, por ejemplo, el aire y el cristal, o el agua y el aire; además, todavía era reciente el triunfo que se había apuntado la ciencia matemática al definir esta refracción (a esta definición seguimos llamándola «ley de Snel» y fue publicada por vez primera por Descartes en 1637) e incluso explicarla por medio de varias hipótesis físicas de la luz. Bartholin había demostrado que en algunos materiales transparentes la refracción podía producirse no de una sola manera, sino de dos. Por consiguiente, tanto la luz como la materia debían de ser más complejos de lo que permitía ver la experiencia normal con materiales más comunes y de lo que estipulaba la ley de Snel: útil recordatorio de que las teorías matemáticas pueden englobar la gama de datos derivados de la experiencia, pero jamás pueden prescribirla.

¿Cómo puede el investigador de la física matemática estar seguro de que sus teoremas son aplicables al mundo real de la experiencia? La respuesta de Galileo, preparada por una larga línea de lógicos que le precedieron, consistió en realizar una prueba práctica. Si partiendo de los teoremas podemos generar algún resultado predicho de índole verificable, entonces, si vemos que este resultado aparece en la prueba, podemos estar seguros de que la teoría es buena. Así, en las *Consideraciones y demostraciones*, Galileo indica cómo la ley de la aceleración que corresponde a los cuerpos que caen libremente puede confirmarse de modo indirecto por medio de experimentos: la teoría

nos dice que los cuerpos que descienden por un plano inclinado sin fricción se aceleran de acuerdo con la misma ley, aunque con mayor lentitud; así, pues, podemos poner a prueba la teoría instalando un plano con tan poca fricción como sea posible y hacer que una bola de latón ruede o se deslice hacia abajo por él. Comprobaríamos entonces que las distintas distancias recorridas equivaldrían a los cuadrados del tiempo empleado en recorrerlas. Galileo dice que con este método podían obtenerse resultados constantes dentro de la décima parte de un latido del pulso, y que en un centenar de pruebas la teoría se vio confirmada sin excepción. (Por motivos que él no podía analizar, fue imposible obtener la aceleración de la caída libre basándose en la del plano, hecho que causó cierta confusión entre los lectores de Galileo.) En los escritos públicos de Galileo es en verdad raro encontrar semejante apelación formal y cuantitativa a la verificación experimental, mientras que (en contraste) Newton dedicaría precisamente la totalidad del tercer libro de sus *Principia* a semejante validación y ejemplificación de los principios matemáticos de la filosofía natural que probara en los dos primeros. Lo más frecuente es que Galileo describa pruebas de un modo vago y general, como al demostrar el principio según el cual los cuerpos ascienden hasta la altura desde la que caen, no importa cuál sea la forma de la trayectoria. En la exposición —aunque no necesariamente en sus investigaciones privadas— gustaba de explotar la fe del *Menón* de Platón en que el sentido común y la comprensión lógica existen en todas las mentes y lo único que necesitan es que los despierten. En algunos pasajes remite a los lectores a su conocimiento de los espejos, de la uniformidad del movimiento de un barco que se desliza por el agua, del movimiento de los fluidos. Alude de paso a numerosos experimentos que podrían hacerse a guisa de demostración o confirmación, pero Galileo no dice que él realmente los haya hecho, quizá porque cree que un libro debería ser completo en sí mismo, sin obligar al lector a seguir un curso de laboratorio. No sabemos si los «experimentos pensados», así como los experimentos reales que hizo, desempeñaron un papel importante en la evolución de las ideas galileanas, pero no hay duda de que constituyen elementos esenciales de su exposición, porque en realidad no espera que su lector haga una viaje por mar a la India, dispare una ballesta desde un carruaje al galope, escale la torre inclinada de Pisa para arrojar pesos desde lo alto o, con el mismo propósito, se encarame al mástil de una galera que navegue a toda velo-

cidad. No es frecuente que Galileo les diga a sus lectores, si es que se lo dice alguna vez: «He aquí un dato nuevo que descubrí por medio de experimentos»; la única excepción es cuando da cuenta de sus observaciones astronómicas, pues también deseaba convertir al lector a su propio punto de vista, pero no afirmando verdades que el lector desconocía hasta entonces (y que, por ende, muy posiblemente seguiría dudando en el futuro), sino enseñando al Simplicio de su diálogo a razonar de modo correcto. Siendo él principalmente (como él mismo decía) un filósofo de la naturaleza (o científico teórico), no tenía nada de tosco empírico y, por lo tanto, no se limitaba a buscar más datos, sino que también aspiraba a una comprensión más profunda. Era muy consciente de que los experimentos son un arma de dos filos, un arma que engaña a quienes la usan toscamente, como cuando escribe sobre el «sublime ingenio» de Copérnico, quien

> constantemente seguía afirmando (estando persuadido de ello por la razón) que dichos experimentos sensibles parecían contradecir; pues no puedo dejar de maravillarme de que constantemente persista en decir que Venus gira alrededor del Sol, y que en un momento está más de seis veces más lejos de nosotros que en otro; y también parece ser siempre de igual grandor, aunque debería verse cuarenta veces más grande cuando está más cerca de nosotros que cuando está más alejado.[7]

El mero empirismo, por consiguiente, no podía descubrir la realidad física, a la que sólo era posible atisbar mediante la alianza del razonamiento analítico (en especial de tipo matemático), la imaginación científica y la experimentación cautelosa y salvaguardada siempre por la razón.

De la crítica del empirismo se desprende que en la ciencia galileana la experimentación no puede confirmar toda la estructura intelectual, cuyos elementos conceptuales trascienden los experimentos. Por ejemplo, el concepto de la aceleración que la ciencia debe a Galileo no puede probarse en el laboratorio, aunque sí es posible ilustrar su aplicabilidad a la representación de fenómenos. Porque definir la aceleración lleva aparejados otros dos conceptos, el del tiempo y el de la velocidad, siendo este último una función del

7. Galileo, *Dialogue*, ed. de G. de Santillana, Chicago University Press, Chicago, 1953, p. 347.

tiempo y del concepto de la distancia. En la naturaleza hay periodicidad e intervalos, pero la naturaleza no ofrece teoría prefabricada de la dimensión que abarque los conceptos de tiempo y distancia. Estos conceptos sólo pueden tener categoría de ideas o constructos mentales que ayudan a formar la visión del mundo y tienen la ventaja, a diferencia de los conceptos de la belleza y la justicia, de que todos los hombre los interpretan en el mismo sentido. Pero su definición es mental en vez de innata en el tejido del universo. El concepto tiempo confiere orden a ciertas clases de experiencia; el concepto distancia, a otras, y de éstas nacen la velocidad y la aceleración que racionalizan a otras más, de tal manera que la primera prueba de una definición de la aceleración debe consistir en que sea asimilable en la lógica a la teoría de la dimensión existente; además, consistente en experimentos, la utilidad del nuevo constructo no puede distinguirse de la utilidad de los que ya existen, el tiempo y la distancia, de modo que, en realidad, es preciso probar conjuntamente todos los constructos que integran el sistema. Aunque el científico galileano procura ahondar cada vez más en la realidad física, los nodos de su exposición de la naturaleza no pueden ser nunca más que constructos mentales, el tiempo, la aceleración, el elemento químico o el electrón, que dan orden y significación a los datos experimentales.

A una visión del mundo natural que excluyera de la realidad todos los rasgos no verificables directamente por medio de experimentos («*Esto* es una manzana, luego las manzanas existen») podríamos llamarla realista-empírica. La visión antigua de la naturaleza que heredó Europa no era totalmente de esta clase, ya que incluía la quintaesencia celeste y las inteligencia planetarias, los elementos de la materia y las facultades de los órganos del cuerpo, entidades o conceptos cuya existencia, a diferencia de la de las manzanas o incluso de los camellos, no puede verificarse mediante la inspección. Pero esta visión antigua se había mostrado característicamente reacia a desviarse del realismo-empirismo en lo referente a la forma y la estructura observables de las cosas; permitía la introducción económica de lo que no podía experimentarse directamente (pero que parecía necesario para la explicación) sólo cuando la introducción era de índole psíquica o inmaterial. Así, el legado de la ciencia antigua había aceptado una visión orgánica de la naturaleza (que en Galeno, por ejemplo, se convierte en una naturaleza personificada) al mismo tiempo que rechazaba las tradiciones no realistas de Pitágoras y

Platón, así como el atomismo con su divergencia entre apariencia y realidad. En cambio, la postura metafísica fundamental de la revolución científica (al menos en las ciencias matemático-físicas) excluye el realismo-empirismo. Ésta es la base del copernicanismo: nuestra Tierra parece hallarse en reposo en el centro del universo cuando en realidad es un planeta; éste es el mensaje que Galileo confirma y justifica. Ésta es la base de la filosofía mecánica, como veremos dentro de poco; cabría decir que era el prerrequisito de la «nueva» ciencia química, que estudiaba el proceso real de la reacción química, tan distinto de la apariencia de combustión, solución, fermentación, etcétera. Generalmente, los conceptos galileanos de aceleración y locomoción distan de ser realistas-empíricos y en esencia requieren la distinción newtoniana entre la apariencia del tiempo y el movimiento y su realidad última, absoluta. Cuando se compromete a realizar una investigación profunda el filósofo debe dar por seguro que se encontrará con que el mundo que ha de construir para su nivel de investigación es muy distinto del mundo de la experiencia normal. Que existen mamíferos que ponen huevos y nebulosas espirales puede verlo con sólo mirar: pero por mucho que vea no puede determinar la existencia de electrones o de agujeros negros. «Ver» correcta y exhaustivamente es, por supuesto, la necesidad fundamental de la ciencia, una necesidad sin la cual todo lo demás es especulación; pero las teorías de lo invisible son la esencia de la ciencia que debe crearse. La creciente complejidad de lo que se ve ha hecho necesaria la constante formulación de teorías más complejas sobre lo que no se ve.

En cada etapa de una ciencia en crecimiento existen tensiones entre lo visto empírico y lo no visto teórico (si no existen tales tensiones, entonces la evolución depende de descubrimientos accidentales, cual es el caso de Bartholin y la birrefringencia del espato de Islandia). Así, el estudio galileano del plano inclinado dejó irresuelto el problema de por qué no podemos (en su teoría sencilla pero correcta dentro de sus límites) determinar, por medio de experimentos en el plano inclinado y casi sin fricción, un valor para la aceleración natural, libre. Así, más adelante, tampoco el cálculo newtoniano de la velocidad del sonido a partir de su teoría de la estructura no vista del aire no concuerda exactamente con las mediciones físicas. Puede que la resolución final de la tensión sencillamente revele (como en los dos últimos casos citados) la necesidad de añadir un término nuevo a la anterior teoría o (como en el caso de la óptica del si-

glo XVII) la insuficiencia absoluta de la teoría original acerca de la estructura invisible de las cosas.

En la forma de ciencia iniciada por Galileo y perfeccionada por Newton, si dejamos a un lado su éxito práctico o de funcionamiento y usamos instrumentos y materiales para descubrir datos nuevos relativos al mundo natural, nos quedamos con un conjunto de teorías en el que las entidades materiales eran constructos intelectuales (gases y fluidos perfectos, partículas ideales, espacios vacíos) y los conceptos aplicados a la organización de estos constructos (aceleración, fuerzas en general, gravedad en particular) eran igualmente idealizados. Ninguna de estas cosas la podemos experimentar directamente: conocemos los cuerpos pesados, pero no la fuerza de la gravedad, salvo por inferencia. A veces (como en el caso del concepto galileano de la aceleración) la relación entre la experiencia y el concepto podía ser muy estrecha; otras veces (por ejemplo, el gas ideal de Newton), si bien el resultado es un modelo físico para una ley experimental, se impone el carácter artificial de tales modelos, que más adelante serían totalmente despedazados. Además, tanto los constructos como los conceptos no sólo eran muy intelectualizados, sino que se hallaban enmarcados en una estructura teórica que llevaba aparejadas, incluso en las postrimerías del siglo XVII, operaciones matemáticas de considerable complejidad: la física dejó de existir entonces en la forma literaria que aún poseía en tiempos de Galileo y Descartes; o, mejor dicho, la forma literaria sólo perduró en las ramas más nuevas y menos organizadas, tales como el estudio de la electricidad. Al considerar el efecto de estos cambios en la naturaleza de la explicación científica, se nos presentan cuatro consecuencias principales. Primera: la crítica racional, esto es, realista-empírica, de las proposiciones caducó por completo, al menos en las ciencias físicas, a partir de finales del siglo XVII: Galileo, Descartes y Newton demostraron sucesivamente este hecho en lo concerniente a la teoría copernicana en particular y a la teoría universal del movimiento. Las únicas explicaciones válidas de los fenómenos observados eran las derivadas de los constructos y conceptos idealizados de la ciencia teórica. Veamos, por ejemplo, los fenómenos de las mareas, sobre las que Galileo formuló una explicación mecánica tratándolas como oscilaciones inerciales (más adelante esta explicación la adoptaron Wallis y otros), mientras que Descartes las atribuía a su «éter» y Newton a la gravedad: los tres filósofos coincidieron en que las pautas de

las mareas en determinados lugares dependían de formaciones geográficas propias de ellos tanto como de la teoría mecánica, aunque ésta era adecuada (afirmaron por turno los tres) para los efectos universales de periodicidad, relación con los movimientos de la Luna, etcétera. Dicho de otro modo, las mareas presentaban un ejemplo extremo de un hecho obvio: que todas las teorías científicas deben concretarse mediante la inserción de los parámetros apropiados antes de que puedan rendir explicaciones concretas. Segunda: dado que una ciencia galileana (y más aún una ciencia newtoniana) la integran constructos, conceptos y una articulación matemática apropiada, y es en principio, aunque no siempre en estricta lógica, de forma axiomática, hay una correspondencia estrecha entre descripción (ahora idealizada) y explicación. La descripción (o teoría) se alcanza mediante el proceso de análisis, mientras que a las explicaciones se llega por el proceso inverso, es decir, la síntesis. Tal como escribió Newton en un famoso pasaje de *Opticks*, siguiendo en este caso al matemático griego Pappo:

> Como en las matemáticas, también en la filosofía natural la investigación de las cosas difíciles mediante el método de análisis debería preceder siempre al método de composición [síntesis]. Este análisis consiste en hacer experimentos y observaciones, y en sacar de ellos conclusiones generales mediante la inducción ... por medio de esta forma de análisis podemos pasar de los compuestos a los ingredientes, y de los movimientos a las fuerzas que los producen; y en general de los efectos a sus causas, y de causas particulares a otras más generales hasta que el argumento termina en lo más general. Este es el método de análisis: y la síntesis consiste en suponer las causas descubiertas y establecidas como principios, y por medio de ellas explicar los fenómenos procedentes de ellos, y probar las explicaciones.[8]

La tercera consecuencia es un rasgo esencial del sistema: un concepto descriptivo universal posee una función explicativa. Relacionada claramente con el proceso general de inducción, esta regla de razonamiento, como se la podría denominar, sirve para contrarrestar la objeción de que las cadenas causales pueden prolongarse indefinidamente, hasta tal punto que nada pueda explicarse a no ser que se

8. Newton, *Opticks*, reedición Dover, 1952, pp. 404-405.

pueda explicar todo. Así, para Galileo la generalización descriptiva de que los cuerpos pesados se aceleran uniformemente hacia el centro de la Tierra tiene gran valor explicativo (por ejemplo, en relación con los péndulos y los proyectiles) y, sin embargo, se abstuvo explícitamente de tratar de desenmarañar la causa de esta aceleración: «De momento el propósito de nuestro Autor es meramente investigar y demostrar algunas de las propiedades del movimiento acelerado (sea cual sea la causa de esta aceleración)».[9] Y Newton, avanzando de la cinemática a la dinámica, definiendo la gravedad como una fuerza que funcionaba de acuerdo con cierta ley y haciendo de ella una fuerza universal con numerosas y diversas manifestaciones, sigue aún sin descubrir su causa material, si es que la gravedad tiene una causa material. De modo parecido, Charles Darwin, en otro mundo del pensamiento, revelará el vasto poder explicativo del concepto de la evolución biológica, incluso con total ignorancia de los mecanismos fisiológicos que ocasionan las variaciones en las formas específicas, sobre las cuales actúa el proceso evolutivo. No importa: es tanto lo que se gana por medio del pensamiento ordenado con precisión a un nivel, irrespectivamente de la incapacidad del filósofo para definir a un nivel más profundo los fenómenos que ello entrañe. Porque la relación inversa entre explicación y descripción hay que verla como una relación que exige cierto orden jerárquico: esto es, los conceptos y constructos que sirven como explicaciones a un nivel puede que sólo cuenten como descripciones a un nivel más profundo: así, para entender algún proceso biológico se invoca la química; para entender la teoría química, investigamos el átomo; y la física atómica nos lleva al estudio de las partículas fundamentales.

Cuarta consecuencia: en la doctrina metodológica de Newton que acabamos de citar, así como en los escritos de otros filósofos del siglo XVII que seguían a Galileo, se dice de modo implícito que lo que no se alcanza como antecedente en el proceso de investigación analítica —esto es, algún acontecimiento o proceso que no se encuentra en las capas jerárquicas, sucesivamente más profundas, de la teoría— no puede invocarse como causa al explicar los fenómenos. Así, de juzgar que la inercia es suficiente como causa de los movimientos planetarios continuos, como, al parecer, desea Galileo, no hace falta creer que unas inteligencias controlan sus revoluciones. Pero este

9. Galileo, *loc. cit.* (en nota 6), p. 159.

principio resultaba riguroso en exceso, sobre todo para los filósofos que aceptaban de manera firme y sincera la creación del universo como artefacto divino. Cuando todo el mundo, en el siglo XVII, estaba de acuerdo en que Dios era la Causa Primera del universo y todos sus fenómenos, ¿en qué punto debía el filósofo invocar a Dios como causa específica de tal o cual fenómeno? Nadie ponía en duda que Dios fuera la causa de Adán y Eva, pero, ¿era también (por ejemplo) la causa directa de la gravedad? Newton y Leibniz, Spinoza y sus críticos cristianos, discrepaban fundamental e irreconciliablemente en asuntos como éstos, toda vez que ningún método físico o metafísico podía trazar la frontera precisa entre estas dos fases del pensamiento.

Los primeros años del siglo XVIII, cuando las escuelas británica y continentales del pensamiento discutían en torno a descubrimientos como el del cálculo, fueron un período de polémicas filosóficas sobre la propiedad (o impropiedad) de ciertos argumentos científicos,[10] medio siglo antes se había suscitado una discusión análoga y sin relación con ésta cuyos ejes fueron Descartes y Gassendi, discusión que a su vez había sucedido a la disputa en torno al copernicanismo. Al menos a primera vista, parece como si los críticos filosóficos de Copérnico, Galileo, Descartes y Newton fueran simples obstruccionistas empeñados en bloquear el debido avance de la teoría científica de acuerdo con las necesidades de los nuevos descubrimientos en los fenómenos. Si reflexionamos, veremos que semejante punto de vista es demasiado ingenuo: la especulación científica no está más exenta de críticas por razones de lógica, coherencia y plausibilidad general, que cualquier otro tipo de especulación, y en modo alguno sucede siempre que las especulaciones originales sobre el modo en que está hecho el mundo sean plausibles, congruentes o estén bien informadas. De hecho, la crítica filosófica de las teorías científicas ha cumplido una función útil al insistir en que se expongan con firmeza y claridad; además, ha contribuido a la eliminación de teorías débiles.

Este papel negativo y crítico de los filósofos, su defensa, por decirlo de un modo que es tal vez demasiado general y directo, de posturas metafísicas contra el empirismo y el matematismo funcional, es muy conocido y entraña un efecto igualmente conocido de todo movimiento histórico: los discípulos de los alocados radicales de una generación se convierten en los conservadores atrincherados que se

10. A. Rupert Hall, *Philosophers at war*, Cambridge U. P., Cambridge, 1980.

oponen a los innovadores de la siguiente generación. Pero, ¿contribuyeron también positivamente los filósofos al desarrollo científico de los siglos XVI y XVII? (Obviamente, había filósofos que eran a la vez «científicos», como Descartes, y «científicos» que eran filósofos, como Galileo y Newton; también había filósofos que escribían en calidad de propagandistas de la ciencia cartesiana o newtoniana; pero lo que buscamos es algo más categórico y fundamental.) Al parecer, el método matemático de abordar los fenómenos naturales, cuya gran fertilidad reconocen ahora todos los historiadores, no interesó mucho a los filósofos; casi por definición, por así decirlo, los que lo adoptaban se veían clasificados, al menos en sentido modesto, como matemáticos. Había filósofos herméticos que no eran matemáticos, como Giordano Bruno, por ejemplo, y otros que eran seudomatemáticos como Robert Fludd, pero los pitagóricos (si tiene sentido considerarlos como una clase) eran en su totalidad matemáticos. A lo que parece, el historiador puede buscar con la máxima confianza una remodelación del pensamiento y la actividad científicos por parte de los filósofos en relación con el desarrollo del empirismo y de la filosofía mecanicista.

A nosotros estos temas se nos antojan estrechamente relacionados, porque Francis Bacon y posteriores autores británicos (Isaac Newton incluido) los unieron firmemente, empleando el reduccionismo como vínculo. Tal como escribió Newton en la segunda (1713) edición de los *Principia*:

> Debido a que las cualidades de los cuerpos sólo nos son conocidas a través de experimentos, debemos proponerlas como generales sólo en la medida en que concurran generalmente con los experimentos ... La extensión de los cuerpos nos la dan a conocer sólo los sentidos, que no responden a ella en todos los cuerpos, pero, como percibimos extensión en todos los cuerpos de los que tenemos sensación, debemos afirmarla de todos. Sabemos por experiencia que muchísimos cuerpos son duros. Sin embargo, la dureza del conjunto tiene su origen en la dureza de las partes y, por lo tanto, inferimos acertadamente la dureza de las partículas atómicas de todos los demás cuerpos, no sólo de aquellos cuya dureza sentimos. Que todos los cuerpos son impenetrables lo inferimos no del pensamiento, sino de la sensación. Nos encontramos con que los cuerpos que manejamos son impenetrables y, por ende, sacamos la conclusión de que la impenetrabilidad es una propiedad de los

> cuerpos en general. Que todos los cuerpos son móviles, y que por medio de ciertas fuerzas (que nosotros denominamos las fuerzas de inercia) persisten en el movimiento o en la inmovilidad lo inferimos de estas propiedades en los cuerpos observables. La extensión, la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad y la fuerza de inercia de todo cuerpo tienen su origen en la extensión, la dureza, la impenetrabilidad, la movilidad y las fuerzas de inercia de las partículas [componentes] y, por consiguiente, sacamos la conclusión de que las partículas fundamentales de todos los cuerpos son extensas, y duras, e impenetrables, y móviles y dotadas de fuerza de inercia. Y esto es el fundamento de toda la Filosofía.[11]

Aunque Newton, muy correctamente, apunta que los filósofos no tienen ninguna prueba empírica de la existencia de los átomos (partículas indivisibles, fundamentales) en la Naturaleza —y podría haber añadido algo que saben ahora los modernos físicos teóricos: que la prueba experimental de la indivisibilidad de cualquier clase de partículas es muy arriesgada—, está perfectamente claro que identifica los datos esenciales de los experimentos con los postulados esenciales de la filosofía mecanicista: dureza, extensión y movimiento de partículas. Pero la ciencia experimental y el reduccionismo no siempre estuvieron tan vinculados como los vemos en este pasaje de Newton, pues al principio el empirismo estaba más vinculado al método «de historia natural» de abordar la naturaleza que al método racional, y en modo alguno se le consideraba como no aristotélico. El argumento que presenta la metodología experimental como precursora medieval de la ciencia moderna ya lo hemos tocado (capítulo 1); esta metodología, sin embargo, iba dirigida a aquella búsqueda de causas que Galileo y sus sucesores rechazaron y de ninguna manera entrañaba reduccionismo.

Una exigencia más directa de planificación filosófica de las nuevas actividades científicas la hizo J. H. Randall, que rechazó las tradiciones medievales de Oxford y París diciendo que no eran lo bastante pertinentes a la revolución efectuada por Galileo, que Randall prefería relacionar con la tradición aristotélica disidente de Padua, la universidad del propio Galileo.

«Lo que París había sido en el siglo XIII, lo que Oxford y París juntos habían sido en el XIV, lo fue Padua en el XV: centros donde

11. I. Newton, *Principia*, Londres, 1713, pp. 357-358.

ideas procedentes de toda Europa se combinaban para formar un cuerpo organizado y cumulativo de conocimientos.» Si esto parece una destilación algo optimista de la realidad histórica en la cual, a lo largo de un prolongado período de tiempo, gran número de maestros hablaron con voces dispares, es indudablemente cierto que Padua poseía una distinguida tradición de averroísmo, que en ella se unían tradiciones activas de índole filosófica y médica y que en tiempos de Galileo fue la más animada y frecuentada de las universidades de Europa. La atención a los problemas de métodos en relación con la medicina, siguiendo los pasos de Galeno, permitió, a juicio de Randall, que a lo largo de unos tres siglos los filósofos paduanos edificasen «una teoría detallada del método científico que los eruditos aristotélicos, que también habían sacado el título de médico, incorporaron en su versión de la naturaleza de la ciencia» y formularon finalmente como «declaración completa en las polémicas lógicas de [Jacopo] Zabarella [1533-1589], en la cual alcanza la forma conocida en Galileo y los científicos de siglo XVII».[12]

Aunque esta tesis es ingeniosa y atractiva, resulta insatisfactoria desde el punto de vista histórico. Difícilmente puede aceptarse la consecuencia que de ella se deriva en el sentido de que Galileo era el único intermediario entre la tradición paduana y «los científicos del siglo XVII», mientras que el punto de vista según el cual la tradición paduana no afectó sólo a Galileo y a Harvey, sino también a Bacon, a Descartes y a otros parece igualmente insostenible. La tesis de Randall excluye de forma deliberada a la escuela anterior de filósofos de mentalidad matemática cuyas trazas aparecen, al menos superficialmente, del modo más obvio en los escritos del propio Galileo (tesis de Duhem); y es forzoso que así sea, ya que Zabarella era amatemático, pero Galileo era todo lo contrario. Por otra parte, pocos estudiantes de Galileo, de esta generación o de cualquier otra anterior, juzgarían aceptable la afirmación de Randall en el sentido de que «en método y filosofía, aunque no en física él (Galileo) siguió siendo un aristotélico típicamente paduano», aunque sólo fuera por la incongruencia tácita que contiene ella entre la «filosofía» y la «física» de Galileo. Los historiadores siempre ha percibido —con o

12. John H. Randall, jr., «Scientific method in the school of Padua» [1940], en P. Wiener y A. Noland, eds., *Roots of scientific thought*, Basic Books, Nueva York, 1957, pp. 144-146.

sin acierto— que los logros científicos de Galileo dependían en gran medida de su original metodología: el argumento del propio Randall parecería reducir a cero la importancia del método si condujo a Zabarella a una clase de física y a Galileo a otra distinta. El lógico examina cuestiones de epistemología y método por sus propios méritos, mientras que para el filósofo de la naturaleza sólo son importantes por el conocimiento de la naturaleza que proporcionan.[13]

La improbabilidad inherente a la pretensión de que un filósofo dado —Zabarella, Francis Bacon o el mismo Descartes— «inventó» un método científico verdadero y único, que sus sucesores del siglo XVII utilizaron fructíferamente por vez primera, estriba en que es imposible probar que el filósofo en cuestión ejerciera una influencia creativa en todos sus sucesores o que una exposición determinada del método fuese tan completa que abarcaba todas las facetas de la nueva ciencia. El historiador del siglo XX esperaría que todo programa completo para la todavía futura ciencia del siglo XVII incluyese cuando menos el reconocimiento de los siguientes elementos: originalidad conceptual, exploración experimental, análisis matemático. Si bien podemos estar de acuerdo en que Galileo es un ejemplo primerizo de filósofo de la naturaleza dotado de todos estos elementos para alcanzar el éxito, no logramos descubrir ningún «metodólogo» sistemático que expusiera la necesidad de cada uno de ellos. Del mismo modo que en las artes los cometidos del artista y del crítico normalmente son diversos (Sainte-Beuve y Balzac, Whistler y Ruskin), también en la investigación de la naturaleza raramente un mismo individuo ha interpretado bien los papeles de intérprete y creador. En la ciencia el verdadero poder creativo depende de mucho más que de un conocimiento práctico de las ramas filosóficas pertinentes (lógica, epistemología, metodología), del mismo modo que en el artista la creación depende de algo más que de su conocimiento de la estética, de la perspectiva, de la ciencia del color, etcétera. Huelga decir que a los científicos prácticos siempre les ha inspirado ver su propia labor en términos de una filosofía imperante, a partir de Aristóteles, y racionalizar así su actividad de acuerdo con un código aceptable de pensamiento bien fundado y de teorías prudentes, pero cabe dudar

13. Charles Schmitt, «Experience and experiment: a comparison of Zabarella's view with Galileo's in *De motu*, *studies in the Renaissance*, 16, 1969.

de la pertinencia que semejantes racionalizaciones *post hoc* tengan para el proceso de descubrimiento.

Así, pues, dudo si vale la pena buscar algún «metodólogo» de finales del Renacimiento que ofreciera una clase única de los éxitos posteriores de la ciencia. Francis Bacon (1561-1626) es el filósofo al que se ha colocado en tal posición eminente con más frecuencia que cualquier otro, por haber previsto la futura importancia de las ciencias naturales, por haber predicho el proceso que permitiría alcanzarla y, hasta cierto punto, por haber mostrado incluso, mediante ejemplos, lo que había que hacer. Se ha dicho que Bacon no fue sólo el fundador de una nueva rama filosófica —la filosofía inductiva, en contraposición a la tradicional filosofía deductiva— sino que también percibió y enseñó una gran verdad relativa al conocimiento mismo: que el conocimiento es poder. Dicho de otro modo, mientras que el objeto de la filosofía escolástica medieval era la reconciliación pasiva del hombre y la naturaleza, la filosofía baconiana enseñaba que el hombre debía explorar activamente la naturaleza y, una vez descubiertos sus secretos, explotarlos para sus propios fines.

Presentar a Bacon sencillamente como el precursor metodológico de la ciencia industrial ha despertado mucho escepticismo en tiempos recientes,[14] entre otras razones porque la descripción de la ciencia cuyo presunto precursor fue Bacon parece, si es que parece algo, más propia del siglo XIX que del XVII. Cuando se enmarca más firmemente a Bacon en su contexto histórico resulta más notable, no sólo su estrecha relación con otros filósofos lógicos de su tiempo, sino también la distancia entre él y los filósofos de la naturaleza contemporáneos (Gilbert y Harvey además de Kepler y Galileo). El elemento operativo de la filosofía de Bacon parece cuando menos tan propio de la tradición de la magia natural como de la tradición de la tecnología. Además, la imagen sencilla de la influencia histórica de Bacon subsistía en la visión que él mismo tenía de la historiografía de la ciencia: que el escolasticismo había imperado hasta su época virtualmente sin alterar ni ser discutido, que toda la tarea de reconstruir el conocimiento seguía siendo cosa del futuro y que el único camino

14. Benjamin Farrington, *Francis Bacon, philosopher of industrial science*, Schuman, Nueva York, 1949 (hay trad. cast.: *Francis Bacon, filósofo de la revolución industrial*, Ayuso, Madrid, 1971); R. F. Jones, *Ancients and moderns*, Washington U. P., Saint Louis, 1936; Paolo Rossi, *Francis Bacon, from magic to science*, Routledge, Londres, 1968.

que llevaba al buen éxito de la reconstrucción era el que describía el propio Bacon. Nuestra visión contemporánea es muy distinta: vemos evolución en el pensamiento europeo a partir del siglo XIII, vemos la magnitud de la evolución de las ciencias antes y durante la vida de Bacon y calculamos que las matemáticas tuvieron mucho que ver con tal evolución. Ya no aceptamos la historiografía de Bacon, por lo que también debe resultar inaceptable la idea tradicional de lo que significaban los escritos de Bacon; lo cual no quiere decir que quitemos a dichos escritos su importancia real, que es considerable.

La primera acusación que lanzó Bacon contra la filosofía natural al uso fue la de ser excesivamente racional y sintética:

> Hay dos maneras, y sólo puede haber dos, de buscar y encontrar la verdad. Una, partiendo del sentido y la razón, alza el vuelo hacia los axiomas más generales, y partiendo de estos principios y su verdad, resueltos de una vez para siempre, inventa y juzga todos los axiomas intermedios. El otro método recoge axiomas a partir del sentido y los detalles, ascendiendo continuamente y por grados de tal modo que al final llega a los axiomas más generales. Esta última es la única verdadera, pero nunca se ha probado hasta ahora.[15]

(Observarán que Bacon, a diferencia de, por ejemplo, Pappo o Newton, contrasta el análisis y la síntesis como métodos alternativos, sin considerarlos complementarios.) Se ha argüido que, por el contrario, la inducción y el método experimental se conocían y practicaban en la ciencia escolástica: «de hecho, la concepción minuciosa de la ciencia natural como una cuestión de experimentos y de matemáticas bien puede considerarse el principal progreso que hicieron los cristianos latinos respecto de los griegos y los árabes».[16] De ello hay ejemplos notables en el magnetismo y en la óptica; pero evidentemente no puede decirse que la filosofía natural de la Edad Media diera la mayor importancia a la investigación experimental. Aunque los estudiantes medievales eran muy aficionados a los compendios y las enciclopedias, sin duda Bacon tenía razón cuando dijo que el almacén de conocimientos objetivos sobre el universo físico estaba

15. F. Bacon, *Novum organum*, libro 1, p. XIX.
16. A. C. Crombie, *From Augustine to Galileo*, Heinemann, Londres, 1952, p. 217; hay traducción castellana: *Historia de la ciencia. De San Agustín a Galileo*, Alianza Editorial, Madrid, 1974.

lastimosamente vacío; y que, mientras se almacenasen tan pocos datos, cabía suponer que las teorías serían falaces. Sin embargo, el mismo Bacon era un lógico (de aquí el título *Novum organum*: Nuevo instrumento) y un racionalista. El único experimento que hizo personalmente, según se dice, fue el que le acarreó la muerte: rellenar una gallina de nieve para ver si conservaba la carne tan bien como lo hacía la sal. De aquí la burla de Harvey: que escribía sobre ciencia como un lord canciller. Sus propios escritos no metodológicos tales como, por ejemplo, *Sylva sylvarum* y *La historia de los vientos*, eran compilaciones literarias, muy alejadas del *Nullius in verba* (bajo palabra de nadie) que la Royal Society elegiría como lema más adelante.[17] Pero este empirismo de bajo nivel, este tomar nota de datos relativos a las mareas o las tormentas o la migración de los pájaros o la aurora boreal era la menor de las inquietudes filosóficas de Bacon: su problema principal no era evitar los errores de hecho —al contrario, apenas era más consciente (si es que lo era) que sus predecesores de las sutiles dificultades para no equivocarse al anotar los hechos, mediante, por ejemplo, mediciones precisas y la valoración crítica del propio autor de los experimentos—, sino evitar los errores intelectuales. ¿Cómo debían pensar correctamente los hombres? ¿Cómo debían razonar partiendo de los abundantes datos recogidos? ¿Cómo podemos distinguir entre una buena y una mala explicación de los fenómenos? Estos eran todavía los problemas de Bacon, como antes lo habían sido de los «metodológicos». El objeto de la exploración de la naturaleza era *saber*, pero saber no se refería únicamente a las historias naturales, los rudimentos del conocimiento, sino a estar en posesión de teorías bien fundadas así como de comprensión profunda. Así, en el más famoso y completo de sus análisis de procedimiento, Bacon llega al punto de vista «anti-sentido común» de que el calor es un modo de movimiento. Bacon distaba mucho de ser un tecnólogo filosófico; si bien es cierto que escribió: «la verdadera y legítima meta de las ciencias no es otra que esta: que la vida humana esté dotada de nuevos descubrimientos y poder», también lo es que declaró, con mayor énfasis, que, como

17. Una versión más vernácula sería «Muéstrame», las palabras atribuidas al hombre de Missouri. Sir William Petty propuso una vez en broma que Tomás el Dubitante fuera el patrón de la Royal Society.

la contemplación misma de la luz es una cosa más excelente y bella que todas sus aplicaciones —también con toda seguridad la contemplación de las cosas como son, sin superstición ni impostura, error ni confusión, es en sí misma más valiosa que todo el fruto de las invenciones ... debemos, basándonos en experiencias de toda índole, esforzarnos primero por descubrir las causas y axiomas verdaderos y buscar experimentos de Luz y no experimentos de Fruto.[18]

Muchos pasajes de los escritos de Bacon denotan que su autor poseía una apreciación filosófica del valor del conocimiento por el conocimiento, no sólo por sus aplicaciones utilitarias. En el pensamiento de Bacon la prueba mediante trabajos experimentales adquirió una importancia especial, no porque los trabajos fuesen la finalidad principal de la ciencia, sino más bien porque garantizaban la rectitud del método empleado. Un descubrimiento o una explicación que estuviera desprovisto de trabajos no podía albergar ningún mérito positivo, no porque fuera inútil para el hombre, sino porque carecía de contacto con la realidad y de posibilidad de demostración. Dado que la ciencia de Bacon debía ocuparse de cosas reales, sus frutos tenían que ser reales y perceptibles. Por desgracia, su filosofía dejó pocos ejemplos de la ciencia experimental, o de cómo el estudio de un tema por medio de experimentos podía conducir a la formulación de una teoría plausible. Bacon demuestra la debilidad de la enseñanza mediante preceptos en vez de ejemplos.

Ciertamente, no opinaba que el método inductivo, verdadero de la ciencia consistiese sólo en recopilar o experimentar «para ver qué pasa». Este método debía emular tanto a la hormiga como a la araña, escribe Bacon, o, más bien, a la abeja, evitando los extremos

recoge su material de las flores del jardín y del campo, pero lo transforma y digiere por medio de un poder propio. No es distinta de esto la verdadera misión de la filosofía, pues ni se apoya exclusiva o principalmente en los poderes de la mente, ni toma la cuestión que recoge de la historia natural y de los experimentos mecánicos y la coloca entera en la memoria, tal como la encuentra, sino que la coloca en el entendimiento alterada y digerida. Por consiguiente, de una relación más estrecha y más pura entre estas dos facultades, la experimental y la racional, como jamás se ha visto aún, mucho puede esperarse.

18. *Novum organum*, I, aforismos 81, 129, 70.

Bacon sabía muy bien que la articulación lógica o cohesión intelectual que hace que un argumento sea hermético procede del pensamiento y no de la mera enumeración de datos o «ejemplos»:

> ... la inducción que procede por simple enumeración es pueril: sus conclusiones son precarias, y expuestas al peligro de un ejemplo contradictorio ... Pero la inducción que es necesaria para el descubrimiento y la demostración de las artes y las ciencias debe analizar la naturaleza por medio de los apropiados rechazos y exclusiones; y luego, después de un número suficiente de negativas, llegar a una conclusión sobre el ejemplo afirmativo, lo cual aún no se ha hecho o siquiera intentado ...[19]

Peor, dice Bacon, «ningún mortal ha pensado aún» en lo que debe aportarse al método de inducción con el fin de que funcione apropiadamente, momento en que podrá generar no sólo axiomas, sino conceptos: «es en esta inducción (avanzada) donde reside nuestra principal esperanza».

Lo que Bacon quería decir con estas palabras resulta más claro en el Libro II del *Novum organum* y especialmente en sus Aforismos 13 al 20. Allí buscó como objeto del conocimiento no una teoría sobre algo —propendía a desconfiar de las teorías por creerlas demasiado idiosincrásicas y subjetivas, cual es el caso, por ejemplo, de William Gilbert y su filosofía magnética—, sino más bien su «Firme y verdadera definición». Si el filósofo lograba captar una vez la definición y naturaleza verdaderas de las cosas, entonces las tenía en su poder, del mismo modo que un herbolario tenía en su poder una planta medicinal cuando conocía su naturaleza, no únicamente su morfología o forma exterior, sino también su constitución o forma interior. Cabe ver en esto algo parecido a la magia, aunque Bacon no fuera consciente de ello. Después de un prolijo comentario del caso concreto del calor, concluye que «el calor es un movimiento, expansivo, moderado y que en su lucha actúa sobre las partículas más pequeñas de los cuerpos». Ni siquiera esto es lo bastante complejo: aunque la expansión va en todas las direcciones, tiende a ser hacia arriba: y la lucha de las partículas no es lenta, sino apresurada y violenta.

Por mucho que la acuidad cinética de estos aforismos baconianos

19. *Ibid.*, I, 95, 105.

impresionara a las generaciones venideras, por muy interesante que sea el papel de Bacon como precursor de la filosofía mecanicista del siglo XVII, sigue siendo cierto que su propia historia natural era vulgar y que su filosofía natural teórica era de un tipo exclusivamente suyo. Nadie ha emulado su utilización de *Ejemplos clandestinos* o *Ejemplos del crepúsculo*, aunque la expresión *Experimento crucial* (por ejemplo), un poco modificada, sí procede de Bacon. Como lógico y como abogado, a Bacon le encantaba dejar correr la pluma, clasificar, trazar distinciones, etiquetar, sin dejar de ser nunca tan hombre de pupitre como los escolásticos a los que criticaba. Sus escritos perpetuaron hasta finales del siglo XVII y más tarde una distinción entre la historia natural (compilación de datos descriptivos) y la filosofía natural (interpretación de fenómenos), la primera siempre previa y subordinada a la segunda, la cual nunca ha representado fielmente el carácter total de la investigación científica. A Bacon no le atraían la ciencia de lo *a priori*, la ciencia matemática y cualquier desarrollo sistemático de una teoría en forma proporcional. No negaba la posible utilidad de las hipótesis provisionales como muletas mentales ni que las pruebas e hipótesis experimentales fueran una actividad útil, pero daba pocas muestras de haber comprendido el hecho crucial de que el valor del trabajo experimental es totalmente proporcional al valor de la idea que le dé origen: el experimentador más consumado desde el punto de vista técnico poco aportará al progreso si no sabe bien qué experimento hará a continuación. Bacon opinaba que pisar la senda acertada para llegar al conocimiento era más importante que poseer una gran inteligencia («es obvio que cuando un hombre corre en dirección equivocada, cuanto más activo y rápido sea, más se extraviará») y, por consiguiente, declaró que en su propuesta para el descubrimiento de las ciencias eran pocas las cosas que se dejaban «a la agudeza y la fuerza de los ingenios», más bien todos estaban casi a un nivel.[20] Aquí el método se nos muestra como una especie de máquina lógica que sólo necesita que la pongan en marcha asiduamente, idea ésta que, por muy contraria que sea a la experiencia histórica, ha aparecido una y otra vez. Si esto semeja una aberración, debemos reconocer, a la inversa, el mérito de Bacon como profeta de la investigación cooperativa organizada: nadie tiene más derecho que Bacon al título de padre del Instituto y de la Clíni-

20. *Ibid.*, I, 61.

ca, así como de la profesionalización de la ciencia. Este elemento de su mensaje lo tuvieron vivamente en cuenta las sociedades científicas.

Puede que, a juicio del historiador, lo que de Bacon tomaron sus sucesores inmediatos fuese, después de todo, bastante elemental: la idea de la ciencia socialmente relacionada, la justificación de proposiciones por medio de la inducción, la importancia del alcance y la precisión experimentales. En los escritos de Bacon hay muchas cosas que pertenecen a la historia de la filosofía más que a la historia de la ciencia. También puede parecer que el legado baconiano fue insignificante comparado con la revolución de la filosofía natural por obra de hombres como Galileo, Kepler, Descartes y Newton, por citar sólo las ciencias físicas. Aunque los británicos en especial veneraban a Bacon y se hacían eco de él, los modelos de la labor científica los buscaron en otra parte. Newton no poseía ni uno solo de los principales escritos de Bacon y aunque su predecesor en la ciencia experimental, Robert Boyle, era un baconiano ferviente, raramente aludía a él.[21] Los «que seguían, tan de cerca como podían, los preceptos de su Maestro, lord Bacon» tendían a ser, como Joshua Childrey, autor de *Britannia Baconica* (1661), coleccionistas de curiosidades, maravillas y prodigios, y hallaban su ejemplo y su autoridad en *Sylva sylvarum*, además de en el catálogo, bastante absurdo, de historias naturales que recopiló el propio Bacon y que abarcaba de la Historia de los Cuerpos Celestes a (n.° 130) la Historia de las Naturalezas y Poderes de los Números. Naturalmente, nunca debe despreciarse el entusiasmo popular y si los ingleses se enorgullecían ahora de Wookey Hole (Somerset) y se dedicaban a coleccionar mariposas y fósiles, este tipo de interés, al igual que la afición por lo antiguo que lo acompañaba en figuras tales como John Aubrey, constituía en sí mismo una faceta auténtica de una civilización cambiante: muchos hombres que empezaron como simples coleccionistas terminaron como entomólogos expertos. La historia natural era (y es aún de una forma muy profesionalizada) una parte apropiada y seria de la actividad científica, y del mismo modo que el metodo de colección y clasificación no era apropiado para la física, también cabe considerarlo, a la inversa, como esencial para las ciencias de la vida. Incluso en la astronomía tenía cabida, pues aún estaba por escribir gran parte de la historia

21. Newton poseía los *Essays* y las *Opuscula varia posthuma* (1658), que había leído y marcado.

natural de los planetas, de la variabilidad de las estrellas y de sus movimientos. Ningún Galileo hubiera podido definir por adelantado las ideas estratégicas de la astronomía física, y menos aún de la geología o la fisiología, tal como estas ciencias aparecerían en el siglo XIX basándose en un conocimiento inmensamente más amplio y más profundo de los datos. Bacon dio un consejo bueno y práctico al decir que hacía falta recoger y anotar una vasta gama de datos sólidos, certificados mediante experimentos, y precisamente esta actividad define en gran medida la parte útil de la ciencia durante doscientos años a partir de la muerte de Bacon; aunque también en esto fueron penetrando con la evolución elementos de pericia técnica y lenguaje especializado que al propio Bacon nunca se le hubieran ocurrido.

Por lo tanto, si Bacon, como reconocían los enciclopedistas franceses, destacó por ser el primer autor consciente de un programa nuevo para la filosofía, fue Descartes quien, después de él, creó por primera vez un sistema antiescolástico de la naturaleza, una alternativa positiva. Aunque Descartes era unos treinta y cinco años más joven que Francis Bacon, la disparidad de las respectivas carreras literarias era tal que difícilmente habría podido acusar la influencia del inglés y, de hecho, sus mentes eran absolutamente distintas. Para un lector moderno este intervalo de treinta y cinco años parece separar la Edad Media de la Europa posterior al Renacimiento. Descartes escribía en lengua vernácula y en calidad de individuo que apelaba a otros hombres como él que hacían frente a los problemas de la filosofía. No escribió «El hombre piensa, por lo tanto existe», sino «Cogito, ergo sum». No proclama la sumisión del individuo a la autoridad o al sistema, sino su derecho de creer lo que debe creer de la filosofía, y nada más. Como relata en el *Discurso del método* (1637), una vez terminada una educación muy completa, en la cual, «no contentándome con las ciencias que realmente nos enseñaban, había leído todos los libros que habían caído en mis manos y que trataban de ramas que se consideran como las más curiosas y raras», se encontró envuelto en gran número de dudas y errores que le persuadieron de que todos sus intentos de aprender sólo habían servido para que descubriese su propia ignorancia. En filosofía, pese a los esfuerzos de los intelectos más distinguidos, todo era discutido y, por ende, nada se libraba de la duda; en cuanto a las otras ciencias, «puesto que éstas toman sus principios de la filosofía», razonó que sobre unos cimientos tan inseguros no podía edificarse nada sólido.

Al llegar aquí, el filósofo realista habría podido argüir la necesidad de la extroversión porque el mundo natural es sin duda real y existe: lo único que hay que hacer es descubrirlo de manera más completa y exacta. Pero como programa (si no del todo como procedimiento) Descartes evitó la línea que le habría llevado en dirección paralela a Bacon. Debido a que el mundo exterior lo conocemos únicamente por mediación de nuestras percepciones sensoriales y éstas pueden tracionar nuestra confianza (haciendo que lo grande parezca pequeño, que lo igual parezca distinto, etcétera), no tenemos en modo alguno garantizado el acceso directo a la realidad que la inducción parece postular. La mente, encontrándose fuera de la naturaleza, es capaz de dudar de todo lo que hay dentro de ésta.

Inmerso en esta perplejidad, Descartes se propuso a sí mismo cuatro «reglas de razonamiento» que aplicó en primer lugar a la única rama del conocimiento que juzgaba lógicamente sana, las matemáticas, tratadas del modo más general combinando las líneas de la geometría con los símbolos del álgebra.[22]

> De esta forma creí que podría tomar prestado todo lo mejor tanto del análisis geométrico como del álgebra, y corregir todos los defectos de uno con la ayuda de la otra. Y, de hecho, la fiel observancia de estos escasos preceptos me dio tal facilidad para desenmarañar todas las cuestiones que abarcan estas dos ciencias, que en los dos o tres meses que dediqué a su examen, no sólo obtuve soluciones de las cuestiones que antes me habían parecido sobremanera difíciles, sino que incluso en lo que respecta a cuestiones cuya solución seguía ignorando, pude, cuando se me presentaron, determinar el medio y la medida en que la solución era posible.

Estas palabras del *Discurso del método* no son exactas desde el punto de vista biográfico, ya que omiten la influencia del modernista Isaac Beeckman (1618) así como los estudios que emprendió el autor adelantándose a su educación jesuita en La Flèche antes de los famosos días de autorrevelación en Baviera. Pero es indudablemente cierto que Descartes trabajó en las matemáticas puras y la

22. Las cuatro reglas eran: 1) no aceptar como cierto nada que no lo fuera evidentemente; 2) analizar los problemas en los elementos más pequeños; 3) poner en orden sus pensamientos empezando siempre por los objetos más sencillos, moviéndose gradualmente hacia los más complejos; 4) hacer listas y reseñas completas para estar seguro de no omitir nada.

ciencia matemática durante muchos años, aplazando el momento de hacer extensivo su método a la filosofía propiamente dicha. El éxito obtenido en las matemáticas puras —de las ideas básicas de la geometría analítica en adelante— le había convencido de que su mente era capaz de albergar ideas claras y distintas, y de razonar basándose en ellas. «Como mi método no estaba estrechamente relacionado con ningún tema especial —escribió—, esperaba aplicarlo a los problemas de otras ciencias de modo tan útil como lo había aplicado al álgebra.» Sin embargo, como Descartes sabía muy bien, el problema de la ontología no iba a desaparecer por mucho que hubiera avanzado hacia la claridad lógica. Las matemáticas tratan de lo que puede ser, la filosofía trata de lo que es. ¿Cómo sabemos lo que es, a fin de formar las ideas claras y distintas que son las únicas con las que podemos razonar provechosamente? El *Discurso del método* brinda una respuesta metafísica: la primera certeza que existe es el propio preguntador:

> De ello saqué la conclusión de que yo era una sustancia cuya esencia completa o naturaleza está sólo en el pensamiento, y que no tiene necesidad alguna de lugar ni dependencia de ninguna cosa material con el fin de existir; de tal manera que este «yo», el alma, a través del cual yo soy lo que soy, es totalmente distinta del cuerpo y es incluso más fácil de conocer que el cuerpo, y que incluso si no lo fuera [el alma] no dejaría de ser todo lo que es.

Descartes pasó luego a examinar la naturaleza de su convencimiento de la veracidad del *Pienso, luego existo*, y descubrió que todas las cosas que se perciben clara y distintamente como ciertas son ciertas, «observando sólo que hay cierta dificultad para determinar acertadamente los objetos que percibimos distintamente». Además, declaró que, como la mente es consciente de su propia imperfección, tiene que haber un ser, Dios, que sea perfecto y que, dado que la perfección no puede engañar, las ideas que se perciben clara y distintamente como ciertas son ciertas porque proceden de un Ser perfecto e infinito. Hasta tal punto son más ciertos los frutos de la razón, dice Descartes, que podemos estar menos seguros de la existencia del universo físico mismo que de la existencia de Dios, «ni nuestra imaginación ni nuestros sentidos pueden darnos la seguridad de nada a menos que intervenga nuestra comprensión ... despiertos o dormidos,

jamás deberíamos permitir que se nos persuada de la verdad de algo a menos que sea con el testimonio de nuestra razón».

Tras esta denuncia del empirismo, esta declaración de que todo conocimiento de la verdad es implantado por Dios, esta afirmación de que la tarea de científico consiste en expresar proposiciones tan clara y distintamente ciertas como las de la geometría, ¿qué sugerencias pueden hacerse para descifrar el enigma de la naturaleza? Según Descartes, es necesario seguir exactamente el procedimiento que Bacon había condenado en Aristóteles, esto es, establecer las generalizaciones principales que son «clara y distintamente ciertas».

> Siempre me he mantenido firme en mi resolución original ... no aceptar como verdadero nada que no me pareciese más claro y cierto de lo que antes me parecieran las demostraciones de los geómetras; y, pese a ello, me aventuro a declarar que no sólo he encontrado medios de satisfacerme en un tiempo breve en todas las dificultades principales que normalmente se tratan en filosofía, sino que también he observado ciertas leyes establecidas en la naturaleza por Dios de tal manera, y de las cuales ha imprimido en nuestras mentes tales conceptos, que después de haber reflexionado suficientemente sobre éstas, no podemos dudar de que se observan fielmente en todo lo que existe o tiene lugar en el mundo.

Newton declararía más adelante, haciéndose eco de Bacon, que sus leyes del movimiento se aprendían por inducción: las leyes cartesianas de la naturaleza eran deductivas y quizá Descartes se habría sorprendido si le hubieran dicho que semejantes leyes universales podían percibirse de algún modo que no fuera racionalmente. Descartes tenía tal confianza en su método que, según afirmó, los rasgos principales de su filosofía no podían ser de otra manera, cual es el caso de un teorema en matemáticas: «En física [yo] debería considerar que no sabía nada si sólo pudiera explicar cómo podrían ser las cosas, sin demostrar que no podrían ser de otra manera. Pues, habiendo reducido la física a matemáticas, esto es posible».[23] Ahora bien, de hecho, apenas hace falta decir que Descartes sólo redujo a matemáticas un poco de física, a costa de emplear suposiciones muy arbitrarias; así lo reconoce más adelante en el pasaje que acabamos de citar, pero su propia visión filosófica consideraba que todo era matemático

23. A Mersenne, 11 de marzo de 1640.

y que todo estaba fundamentado en ideas claras y distintas. Por consiguiente, como sistema firmemente lógico, no podía ser falso.

Así, la ciencia de Descartes es un sistema centrífugo, que funciona hacia fuera a partir de la certeza de la existencia de la mente y de Dios para abarcar las verdades universales o leyes de la naturaleza detectadas por la razón, y luego, a partir de la «concatenación de estas verdades», revelar los mecanismos que intervienen en fenómenos concretos. Es sistemática, a diferencia de la «nueva filosofía» de Bacon o Galileo, porque su objetivo no estriba en enunciar una exposición correcta aquí y otra allá, a medida que sean accesibles al intelecto, sino proporcionar un tejido invariable cuya pertinencia a los detalles es el único tema de investigación que queda. En este sentido, a pesar de su desprecio por la escolástica, Descartes buscó para sí mismo la autoridad dominante de un nuevo Aristóteles. A decir verdad, entre los científicos cartesianos, y todavía más entre los filósofos cartesianos de generaciones posteriores, floreció una nueva escolástica a través de la disección, el embellecimiento y la expansión de las doctrinas de Descartes, hasta que, al igual que el aristotelismo en los siglos XVI y XVII, fueron a su vez considerados como baluarte contra las innovaciones peligrosas y como justificación filosófica de la ortodoxia religiosa.

Aunque reclama para su ciencia la verdad formal y axiomática de las matemáticas, sólo los dos ensayos físicos que se añaden con la *Geometría* al *Discurso del método*, esto es, *Dióptrica* y *Meteoros*, poseen este carácter, si bien no se presentan en forma proporcional. Para expresar el resto de su filosofía, Descartes eligió la prosa narrativa. Los dos ensayos ópticos —pues el principal «meteoro» del segundo es el arco iris— ejercieron una influencia enorme debido a que desarrollaban una forma de física matemática distinta de la galileana por estar firmemente ligada a hipótesis físicas, de hecho, a la filosofía mecanicista. Para todo estudiante de dióptrica (es decir, de la refracción) de principios del siglo XVII la piedra de toque era la «ley de Snel» (sen i/sen $r = k$); Thomas Harriot la sacó primero (1601) sin revelar nunca la ley; Kepler estuvo a punto de sacarla; luego llegó Willebrod Snel (después de 1621) y finalmente Descartes, que la publicó en su *Dióptrica* (1637). Los tres primeros trabajaron inductivamente, esto es, haciendo experimentos cuidadosos; no se sabe cómo descubrió Descartes la «ley de Snel», pero la presentó como un descubrimiento racional a partir de su teoría de la natura-

leza de la luz y así fue aceptada de manera general como justificación de su método.[24] Más adelante y sucesivamente el matemático Pierre de Fermat de Toulouse (1601-1665) e Isaac Newton demostrarían que era posible desarrollar «reconstrucciones racionales» de la «ley de Snel», a la vez distintas unas de otras y de la de Descartes, partiendo de otros principios físicos y, por consiguiente, ni los principios físicos ni la reconstrucción racional podían considerarse como probadas por el hecho de concordar con datos experimentales. No obstante, era (y es) siempre posible mantener que, por una razón u otra, las improbabilidades excluían todos los grupos de ideas salvo el favorito del autor.

De ningún modo hubiera podido crear Descartes un sistema general de la naturaleza según el modelo de sus tres ensayos matemáticos de 1637: carecía de técnica, método, información e ideas para realizar una ambición tan vasta. Sobre todo, aunque propondría una filosofía completamente cinemática de la naturaleza, no acertó a idear una cinemática propia y criticaría la de Galileo simplemente por superficial y por mostrar ignorancia de la verdadera realidad del movimiento. Descartes sabía de sobra que el enfoque matemático de la filosofía podía abarcar toda la gama comprendida entre lo absurdo (Fludd, el oponente de Marin Mersenne, aliado de Descartes) lo fantástico (Kepler) y lo antinatural (Galileo); él no quería describir ningún mundo irreal —pues como tal interpretaba el mundo de abstracción de Galileo—, sino el mundo de la experiencia. Sin embargo, no rechazó el método axiomático propio de las matemáticas: ante todo era preciso que hubiera principios que pudiesen aceptarse como verdaderos por ser claros y distintos, de tal manera que nadie pudiera dudar de ellos; pero luego era necesario demostrar el resto, no matemáticamente, sino utilizando argumentos verbales «de manera geométrica». Así, confusamente, *more geometrico* llegó a significar lo contrario de su enunciado literal. Además Descartes prefirió introducir el recurso del modelo: describió, según dice, no nuestro propio mundo, sino un mundo que tenía exactamente los mismos fenómenos; no el cuerpo humano real, sino un mecanismo poseedor de todas las

24. Es bien sabido que Descartes emplea un lenguaje diferente, y de aquí que parezcan modelos variantes, para explicar la acción física de la luz en la *Dioptrics* y los posteriores *Principia philosophae* (1644): en esta última obra el paso de la luz es instantáneo; en la primera ocupa conlleva un intervalo de tiempo. Los comentaristas discrepan en relación con la importancia de esta contradicción.

propiedades del cuerpo de un hombre. La finalidad del empleo del modelo era (y es) hacer que una petición tan escéptica como: «enseñadme un corpúsculo de sangre» (que Descartes no hubiera podido formular) pierda su sentido; la única correspondencia que cabe esperar es la que existe entre lo que la sangre es y hace en el modelo y lo que es y hace en un hombre. Descartes podía presentar mecanismos minuciosamente detallados, en verdad elegantes, que él imaginaba responsables de los fenómenos, sin verse frustrado por la petición de que presentara una partícula de magnetismo. Dicho de otro modo, de la misma manera que la «reconstrucción racional» es consecuente con el tratamiento matemático de la *Dióptrica* y de los *Meteoros*, también es posible merced al recurso del modelo en el contexto de la teoría no matemática. Y, si se le considera como un instrumento para seguir investigando, dicho recurso brinda la oportunidad de averiguar, por medio de la comparación, cuáles son en realidad las causas o partes de las cosas que hasta ahora eran imperceptibles.

¿Cuál era, a juicio de Descartes, la idea fundamental de la filosofía? En lo que se refiere a la composición física del universo, Descartes opinaba que debíamos empezar por los conceptos de la materia, que debe tanto dividirse en partes como ser capaz de movimiento. La idea primaria de la materia es que ocupa espacio; de aquí, arguyó Descartes, que no pueda haber ningún espacio que no esté ocupado por la materia o, lo que es lo mismo, que esté vacío. Asimismo, definió las subdivisiones de la materia, la menor de las cuales era análoga al éter de filosofías posteriores debido a que llenaba todo el espacio que por lo demás estaba vacío de materia y cumplía un cometido activo en los fenómenos; también delineó (incorrectamente) la forma en que las partículas materiales se reparten el movimiento cuando chocan unas con otras. El universo modelo cartesiano había evolucionado con el tiempo hasta alcanzar el estado que se observa ahora, siendo los planetas estrellas menores solidificadas, por ejemplo, como sistema cerrado.[25] La materia original había cambiado de forma, pero sin que en ningún momento se le agregase materia o movimiento. Tratándose de un sistema cerrado en el que no había ni pérdida ni

25. Descartes enseñaba que, si bien es cierto que Dios había creado el universo tal como es, lo creó como si hubiera evolucionado desde un estado primitivo, esto es, con un pasado consubstancial. Esta idea reapareció geológicamente más adelante.

aumento de movimiento (que para Descartes equivale a la energía de la física posterior), la historia del universo está escrita en la redistribución del movimiento por medio del impacto de partículas; las distintas clases de redistribución que se producen son la causa de la enorme diversidad de los fenómenos que clasificamos cualitativamente como vivos, cayentes, magnéticos, químicos, etcétera. (Como podía utilizar tres clases de materia, cada una de ellas capaz de cumplir muchas funciones, y una variedad infinita de movimiento, a Descartes nunca le faltaban hipótesis.) Así, la naturaleza esencial de todos los cambios que se observan en el universo, desde el solevantamiento de una montaña hasta el nacimiento de un ratón, es la misma, pero cada una sigue su propio camino en las categorías de acción y reacción que inventa Descartes y sólo en un equilibrio último, inefable de las cosas, un equilibrio que preserva la constancia en medio del cambio, todo el espacio permanece siempre lleno y la suma total del movimiento permanece constante. La afirmación relativa a la totalidad en el universo cartesiano —que no sería válida, obviamente, para sistemas meramente locales o restringidos como el planeta Tierra, cuyo aislamiento o encierro es sólo ingenuamente aparente, ya que recibe luz y calor del Sol, por ejemplo— acarreaba la consecuencia de que esta cinemática fundamental de la física cartesiana debía permanecer incuantificable para siempre. No sin esfuerzo y distorsión podría adaptarse alguna vez a las matemáticas galileanas.

Al construir sus modelos, la experimentación no fue para Descartes más que un débil sustituto de la reconstrucción racional, que era cuando la mente, partiendo de ideas claras y distintas, lograba percibir múltiples rutas para alcanzar una explicación dada, y tenía que tratar de descubrir cuál de ellas había escogido la Naturaleza. Como los principios de la filosofía eran ideas, sus teorías subsidiarias se configuraban de forma que encajasen con ellas y no con los datos experimentales. Era en esencia deductiva a partir de estas leyes naturales y si el conocimiento no proporcionaba los materiales indispensables, entonces tenían que inventarse con la ayuda de la deducción razonada, del mismo modo que los vórtices celestes que transportaban los planetas alrededor del Sol, las tres clases de materia y los poros variamente ideados de las sustancias fueron inventados de acuerdo con las exigencias de la experiencia y la razón. Desde luego, se respetaba la experiencia en el sentido de que en su modelo Descartes procuraba explicar la suma de los fenómenos de la naturaleza

tal como él los conocía, ya que es obvio que no hubiera podido deducir el magnetismo dentro de su sistema de no haber conocido sus manifestaciones. Pero Descartes no hizo ningún intento de confirmar sus mecanismos detalladamente por medio de experimentos. En su opinión, los cimientos del conocimiento quedaban mejor asentados sin ello:

> ... porque, en el comienzo, es mejor utilizar únicamente lo que se presenta de forma espontánea a nuestros sentidos, y de lo cual no podemos hacer caso omiso, con tal que le dediquemos un poco de reflexión, por ligera que sea, que preocuparnos por fenómenos más extraños o recónditos; siendo el motivo de ello que los más extraños a menudo nos engañan mientras las causas de los más corrientes siguen siendo desconocidas ...

Descartes desconfiaba de los experimentos que indicaran alguna conclusión desligada de un sistema deductivo. Esto no quiere decir que él o sus sucesores fuesen totalmente ciegos a los méritos de la experimentación, aunque ésta sólo podía ser accesoria para los casos en que fallase la aplicación de ideas claras y distintas, o en una investigación oscura o para demostrar verdades de manera más convincente. A los diez años de la muerte de Descartes la experimentación organizada fue puesta en marcha en Inglaterra (en Oxford y en Londres), en París y en otros centros intelectuales de Francia, en Italia y en Alemania, estimulada en parte por los escritos y el ejemplo de Galileo y sus discípulos, en parte por los preceptos de Bacon, en parte por el alboroto causado por una ciencia recién nacida, la neumática, y en parte por la labor paciente de Gilbert, Harvey y otros muchos. La práctica, a diferencia de la metodología, de la experimentación tenía numerosos orígenes diversos y dispersos. La filosofía cartesiana se vio cogida por su vigor independiente y tuvo que tomar en préstamo su afirmación de que la superioridad de la nueva filosofía respecto de la antigua podían verificarla experimentalmente los ojos. Durante los últimos decenios del siglo XVII los cartesianos y neocartesianos adoptaron activamente la demostración experimental como medio de vindicar su filosofía; al mismo tiempo, la confirmación empírica de la veracidad de sus principios generales cuando menos la buscaban ansiosamente científicos prácticos tan dotados como el académico francés Edmé Mariotte (muerto en 1684), así como maestros modernistas de

filosofía que estaban introduciendo por la fuerza el cartesianismo en universidades reacias a él.

La cinemática o, como es más frecuente denominarla, filosofía mecanicista de Descartes constituye el alma y el carácter de la innovación científica de la segunda mitad del siglo XVII; de hecho, lo fue hasta verse depuesta por la creciente autoridad de Newton. En este medio siglo virtualmente todo el mundo era o había sido cuasicartesiano, sin exceptuar a inductivistas ingleses tales como Robert Boyle e Isaac Newton. La fertilidad y alcance inmensos de la inspección cartesiana de la naturaleza en los ensayos, en los *Principia philosophiae*, en *De homine*, en las cartas y en otros escritos le daba una voz poderosa para hablar de cualquier tema; Descartes era más universal que «especialistas» como Kepler o Galileo, más convincente que los autores de sistemas universales que rivalizaban con el suyo como, por ejemplo, Kenelm Digby (1603-1665).[26] Además, en su versión de la filosofía mecanicista, una versión más intransigente, más rigurosa, más enfática que cualquier otra, Descartes parecía un pensador más decisivo, de más alcance, que Bacon o Galileo, o incluso Gasendi, o Thomas Hobbes o cualquier otro teórico general de la naturaleza que fuera contemporáneo suyo. Todos estos espíritus críticos, innovadores, veían en el mecanicismo una adecuada alternativa al mundo renacentista de las cualidades, la magia y el misticismo: en Marin Mersenne (1588-1648), fraile y apologista religioso, organizador científico, amigo y aliado de Descartes, tenemos un buen ejemplo de una mente que de aborrecer el materialismo pasó a explorar gozosamente el mecanicismo.[27] Descartes era el espíritu conductor.

Es obvio que el progenitor último de la filosofía mecanicista del siglo XVII fue el atomismo griego, que ahora conocemos con mucho detalle por los escritos de Epicuro y su discípulo romano Lucrecio.[28] El temible estigma de ateísmo que tales escritos llevaban consigo tiñó la versión cartesiana y otras versiones de la filosofía mecanicista hasta finales de siglo y sigue resonando en el debate filosófico entre

26. La principal obra de Digby tiene un título largo: *Two treatises, in one of which, the nature of bodies; in the other, the nature of man's soule, is looked into: in way of discovery, of the immortality of reasonable soules*, París, 1644. En 1644 ni las obras de Galileo ni las de Descartes habían alcanzado gran difusión, especialmente entre los ingleses.

27. Robert Lenoble, *Mersenne, ou la naissance du mécanisme*, París, 1943.

28. En 1600 ya se habían hecho unas treinta impresiones de *De natura rerum*, publicada por vez primera en 1473.

Newton y Leibniz (1710-1716). La pregunta sobre si un universo mecanicista podía ser también un universo divino nunca recibiría una respuesta clara en los términos de aquella época. A pesar de ello, muchos filósofos devotos consideraban que definir a Dios como el Artífice Trascendente no constituía una derogación de la majestad divina. El atomismo, más puro, más erudito, cruza el pensamiento del siglo XVII paralelamente a las imaginaciones, más libres, de Descartes y otros. Su principal exponente fue Pierre Gassendi (1592-1655), quien, por lo demás, obtuvo cierta celebridad en la astronomía y la física. A partir de 1625 más o menos, Gassendi fue el primer filósofo que intentó desarrollar una física completamente mecanicista que se fundara en Epicuro y rechazase a Aristóteles; en gran medida venía a ser como una paráfrasis y una ampliación de Lucrecio, con la salvedad de que Gassendi era cristiano. Al igual que en el caso de los atomistas griegos, las complejidades de la sustancia debían explicarse sin hacer ninguna suposición de tipo inmaterial, postulando, de hecho la existencia de átomos en el vacío como única realidad verdadera; las propiedades físicas se localizaban en el tamaño y la forma imaginarios de las partículas componentes, a las que se podía imaginar redondas y lisas para tener fluidez o enganchadas unas a otras para tener fuerza. En Bacon y Galileo, sin embargo, ya habían existido (como dijimos antes) los comienzos de una teoría verdaderamente cinética de las partículas, sobre todo en relación con el calor. Isaac Beeckman, el filósofo holandés que influyó en el joven Descartes, fue otro de los que observaron que los tres variables, tamaño, forma y movimiento, debían tenerse en cuenta en una teoría de las partículas.[29] Aunque en Galileo ya se encuentra la famosa distinción entre cualidades primarias y secundarias asociadas inmortalmente con John Locke, así como otros muchos datos que la apoyan, para él, al igual que para Bacon, la filosofía mecanicista tenía una importancia relativamente menor en el conjunto de las reformas del conocimiento; para el primero, era menos importante que las matemáticas; para el otro, menos esencial que la inducción. Si bien ninguno ponía en duda que las cualidades aristotélicas debían sustituirse por mecanismos particulados, ninguno era un atomista estricto; de hecho, Bacon escribió que el método apropiado para descubrir la «forma o verdadera dife-

29. *Journal tenu par Isaac Beeckman de 1604 à 1634*, ed. de C. de Waard, La Haya, 1939-1945, I, 216 (1618).

rencia de una naturaleza dada, o la naturaleza a la cual la naturaleza se debe, o la fuente de la que emana», no conduciría a átomos, lo cual da por sentado el vacío, y la inmutabilidad de la materia (ninguna de las dos hipótesis es correcta), sino a las partículas reales como descubrimos que son.[30] Muchos filósofos de la naturaleza posteriores compartieron el punto de vista de Bacon en el sentido de que la versión atomista de la teoría particulada o corpuscular de la materia era innecesariamente dogmática: de hecho, sería siempre cierto, tanto lógica como experimentalmente, que la definición del «átomo» es enteramente una función de las pruebas de divisibilidad que haya que aplicar. Muchos también encontraban repugnante e incomprensible el concepto del vacío. Hasta finalizar el siglo no encabezaría Newton la vuelta a un atomismo epicúreo muy modificado; en su juventud había influido en él la *Physiologia* (1654) del más importante de los atomistas ingleses de mediados de siglo, el médico Walter Charleton (1620-1707), y en términos de física esencial el concepto del «éter» le había causado tantas dificultades como el del espacio vacío.[31]

Mientras tanto, durante la mayor parte del siglo la tendencia más fuerte fue la versión cartesiana o cinética de la filosofía mecanicista propuesta con grados variables de eclecticismo, recalcando los efectos del movimiento en las partículas en vez de su hipotético tamaño o forma; la idea de que los fenómenos podían ser el resultado de los movimientos de uno o más éteres extremadamente tenues pero materiales (llamados también «efluvios», «espíritus», etcétera) no era en modo alguno incompatible o contradictoria. A partir de mediados de siglo se hicieron experimentos en el «vacío» (es decir, con la presión del aire reducida a 2,54 centímetros de mercurio o menos) y se comprobó que al menos la luz y el magnetismo lo atravesaban sin verse afectados, lo cual sugirió que en el espacio y dentro de los poros existían cuerpos sólidos de algún medio universal que eran mucho más sutiles que el aire. No es exagerado decir que el experimentalismo alcanzó la madurez alrededor de mediados de siglo en asociación con el cartesianismo no dogmático, o versión ecléctica de la filosofía mecánica, detectable (por ejemplo) en la obra de Borelli en Italia, de

30. *Novum organum*, libro II, aforismos 1 y 8.

31. Charleton parafraseó el contenido de las *Animadversiones* de Gassendi, de 1649, la primera exposición completa de su física atomista. Charleton escribió también sobre Stonehenge como estructura danesa.

Huygens y Mariotte también en Italia, y de los primeros miembros de la Royal Society en Inglaterra, sobre todo Robert Boyle. Así, Descartes (principalmente) y Gassendi crearon un lenguaje común y moderno para la ciencia europea, que aproximadamente a partir de 1670 disfrutó de una comunidad de espíritu progresista y de una filosofía natural básica que no existían en absoluto a principios de siglo. El hecho de que se dieran diferencias de detalle muy significativas entre las epistemologías de los diversos autores, así como entre sus metafísicas y métodos, no debería ocultar otro hecho igualmente real: que hombres de todas las naciones podían comunicarse fructíferamente para identificar problemas comunes, así como concebir las soluciones de la misma manera. Descartes fue una figura mucho más auténticamente internacional que Galileo o Bacon, y el hecho mismo de que escribiera como filósofo contribuyó a que sus ideas científicas alcanzaran mayor circulación; las ideas cartesianas llevaron el primer aliento de una perspectiva nueva, de una vitalidad fresca en la filosofía natural, a muchos lugares donde el convencionalismo intelectual seguía como siempre. Así, Oxford, debido a que allí se fomentaba la lectura de Descartes, era considerada a mediados de siglo como una universidad mucho más avanzada que Cambridge. Descartes fue el principal inspirador de las abundantes ideas y descubrimientos que hicieron de París el foco científico de Europa desde alrededor de 1630 hasta finalizar el siglo y que fueron el origen de la posterior dominación empírico-matemática inglesa. Incluso críticos de Descartes como Robert Boyle e Isaac Newton que, gracias a su confianza en el método experimental o galileano, descubrieron el carácter especioso de las teorías físicas de Descartes, habían hallado su punto de partida en aquellas mismas teorías; de hecho, no tergiversaré la verdad si afirmo que las principales actividades de la ciencia física durante más de un siglo después de la muerte de Descartes pueden interpretarse como un comentario de sus obras. Y si los *Principia philosophiae* resultaron efímeros en comparación con los *Principios matemáticos de la filosofía natural* de Newton —hasta el título hace pensar en una reacción— su influencia creó nuevos progresos al llevar la ciencia posterior del siglo XVII a abrigar ideas de mecanicismo, de la estructura corpuscular de la materia, de la importancia de las «leyes naturales».

Los *Principia philosophiae* (1644) de Descartes fueron el principal fundamento de esta herencia común que compartieron los teó-

ricos de la física, del mismo modo que su *Geometría* lo sería entre los matemáticos. Partiendo de la suposición de que en la naturaleza no hay poderes mágicos ni fuerzas ocultas (algunos creían que la gravedad y el magnetismo lo eran) y suponiendo que el universo está continua y completamente lleno de alguna materia particulada en movimiento, Descartes ideó un modelo mecánico de una complejidad extraordinaria para representar todas sus acciones. Sus partículas, de las cuales había tres especies, no eran átomos, pues él las imaginaba divisibles, si bien en la naturaleza normalmente no estaban divididas. El primer elemento era un polvo fino, de partículas irregulares para que pudiese llenar por completo los intersticios entre las partículas mayores. El segundo elemento (*matière subtile* o éter) consistía en partículas esféricas bastante más gruesas, aptas para el movimiento, y el tercer elemento lo integraban partículas irregulares y lentas, todavía más gruesas. Estos tres elementos correspondían más o menos al Fuego, el Aire y la Tierra de Aristóteles y, como se componían de la misma materia, podían transformarse unos en otros. Para los cartesianos esto no era una hipótesis arbitraria, sino una verdad (según Rohault) «que se desprende necesariamente del Movimiento y la División de las Partes de la Materia que la Experiencia nos obliga a reconocer en el Universo. De tal modo que los Tres Elementos que he establecido, no deberían verse como Cosas imaginarias, sino que, al contrario, como son muy fáciles de concebir, y vemos la necesidad de su Existencia no podemos desechar razonablemente su Uso, al explicar Efectos puramente Materiales». La naturaleza de una sustancia era determinada principalmente por su contenido del tercer elemento; sus propiedades, del segundo. Puesto que Descartes negaba que las partículas del tercer elemento tuvieran peso o atracción intrínsecos, la dureza (la cohesión de estas partículas) se atribuía a que permanecieran en reposo juntas; la fluidez, a su movimiento relativo; pero este movimiento no era intrínseco, sino que lo impartían las partículas del primer elemento y el segundo. Así, en una solución las partículas más gruesas del solvente, al ser agitadas, desalojaban a las del material disuelto; sin embargo, si las partículas del solvente eran demasiado ligeras, o si los poros del material sólido eran excesivamente pequeños para darles entrada, éstos no se disolverían. Cuando los poros situados entre las partículas del tercer elemento eran lo bastante grandes para que en ellos entrara una gran cantidad del segundo elemento, la sustancia era un «fluido

elástico» (aire), cuya tendencia a la expansión era fruto del movimiento muy libre y rápido de las partículas del segundo elemento. La llama misma consistía en materia en su forma más sutil y sometida a una agitación violentísima y era, por lo tanto, el disolvente más eficaz de otros cuerpos, mientras que la sensación de calor aumentaba con el grado de movimiento en las partículas del cuerpo calentado. Rohault señala que el cobre, al limarlo, se calienta menos que el hierro porque, siendo el cobre el más dúctil de los dos metales, sus partículas, para separarse, no requieren una agitación tan violenta como las del hierro. El mayor movimiento que se asocia con el calor era también la causa de la expansión termal. En cuanto a la luz, se creía que era «cierto Movimiento de las Partes de Cuerpos luminosos en virtud del cual son capaces de empujar en todas Direcciones a la sutil Materia (segundo elemento) que llena los Poros de los Cuerpos trasparentes», y la iluminación secundaria se atribuía a la tendencia de esta materia a alejarse del cuerpo luminoso en línea recta. Los cuerpos trasparentes tenían poros rectos a través de los cuales podía pasar la *matière subtile*, los cuerpos opacos bloqueaban o retorcían los poros. Si este ejercicio de presión por parte del cuerpo luminoso se veía restringido o hallaba resistencia, el cuerpo se calentaba. La refracción y la reflexión de esta presión (o, mejor dicho, pulso) que es luz se explicaban trazando una analogía con el rebotar de las pelotas elásticas. Al ocuparse del magnetismo, los cartesianos cuidaban de poner de relieve que «si bien podemos imaginar que hay Algunas Clases Especiales de Movimiento que pueden explicarse muy bien atendiendo a la Atracción; sin embargo, esto se debe sólo a que irreflexivamente lo atribuimos a la Atracción, cuando en realidad es obra del Impulso»; por ejemplo, se dice que un caballo tira de un carro cuando en realidad lo empuja apretando la collera. De hecho, los efectos magnéticos los causaban corrientes de partículas parecidas a tornillos que entraban en los polos de la Tierra y pasaban de uno a otro por encima de su superficie, atravesando poros parecidos a tuercas en piedra imán, hierro y acero, y, por lo tanto, eran capaces de ejercer presión sobre estos materiales magnéticos.

Teorizando de esta manera sobre los diferentes movimientos de las tres especies de materia, los físicos cartesianos trataban de explicar todos los fenómenos físicos que eran conocidos en la segunda mitad del siglo XVII. Tenían a su favor algunos descubrimientos notables hechos en aquella época: por ejemplo, que la elevación del agua

en las bombas y otros efectos análogos no se debían al *horror vacui* o a la atracción, sino simplemente a la presión mecánica de la atmósfera. También explicaban mecánicamente la gravitación como resultado de la presión y hacían extensivas sus ideas corpusculares a las reacciones químicas. La idea de una materia particulada en movimiento era, pues, el fundamento mismo de la ciencia cartesiana, la base de un sistema homogéneo de explicación. El hecho de que (como dice Rohault) «las pocas Suposiciones que he hecho... no sean nada comparadas con el gran Número de Propiedades que voy a deducir de ellas, y que son confirmadas exactamente por la Experiencia» era una buena razón para creer «que Aquello que primero parece una Conjetura será recibido como una Verdad muy cierta y manifiesta». Tal como la exponían Descartes y sus sucesores, esta «filosofía mecanicista» era ilustrada por muchos experimentos cualitativos; pero difícilmente podían decirse que éstos fueran la prueba del sistema cartesiano, que, además, siempre siguió siendo enteramente no matemático.[32]

El gran neocartesiano Christiaan Huygens (1629-1695), que durante tanto tiempo fue uno de los principales ornamentos de la vida intelectual parisina, además de pilar de la Real Academia Francesa de las Ciencias, calificaría los *Principia philosophiae* de «un beau roman de physique». De hecho, la idea cartesiana de la naturaleza y del hombre como máquinas iba a recibir escasa confirmación experimental. La claridad y la distinción de las ideas, por muy racionalmente impecables que fuesen, demostraron no tener nada que ver con la cuestión de la verdad contingente. El método, que Francis Bacon atacó en los eruditos, volvería una vez más a ser objeto de una crítica destructiva por parte de los baconianos ingleses de la Royal Society. Tal vez pueda decirse con justicia que los éxitos de Descartes en la ciencia se debieron menos a los méritos de su método que a su genio innato para la investigación. Hay un aspecto, sin embargo, tanto en el método como en la textura de su pensamiento relativo a temas

32. Todas las citas de estos dos párrafos proceden de John Clarke, trad., *Rohault's system of natural philosophy illustrated with Dr. Samuel Clarke's notes mostly out of Sir Isaac Newton's philosophy*, Londres, 1723, I, pp. 115-117, 156, 201 ss.; II, p. 166; I, p. 203; II, 169. Jacques Rohault (1620-1672) era el principal exponente de la física cartesiana en aquella época y su *Traité de physique* se había publicado por vez primera en 1671. La falacia irreflexiva del argumento contrario a la atracción —como si las fuerzas compresiva y tensil fueran idénticas— es muy típico.

científicos, que merece destacarse. Descartes era muy consciente de la importancia que en cualquier labor investigadora tenía la imaginación científica, facultad de la que él estaba tan bien dotado que apenas se percataba de sus limitaciones cuando era controlada por la razón sola, sin experimentación precavida. Bacon había reconocido que la imaginación o intuición podía superar las obstrucciones; Galileo también admitía que en las ciencias demostrativas era posible conocer una conclusión antes de poder probarla:

> Tampoco necesitáis poner en duda que Pitágoras, mucho antes de encontrar la demostración por la que ofreció la hecatombe, estaba seguro de que el cuadrado del lado subtendiendo el ángulo recto en un triángulo rectángulo era igual al cuadrado de los otros dos lados: y la certeza de la conclusión ayudó no poco a investigar la demostración ...[33]

Vemos que Descartes aprecia de modo más manifiesto la función de la imaginación dirigida, aprovechando el problema de que se trate, al formular hipótesis que deban ponerse a prueba por medio de experimentos u otros procedimientos:

> ... el poder de la naturaleza es tan amplio y vasto ... que apenas he observado un solo efecto particular que en el acto no pueda reconocer como capaz de ser deducido de muchas formas distintas partiendo de principios, y que mi mayor dificultad suele ser descubrir de cuál de estas maneras el efecto depende de ellas; pues de esta dificultad no puedo de otra forma librarme que buscando de nuevo ciertos experimentos, que pueden ser de tal manera que su resultado no sea el mismo si es de una de estas maneras como debemo explicarlo, como sería si hubiera que explicarlo de otra.[34]

Aquí no se propone el experimento para descubrir lo desconocido, como hace Bacon, ni para confirmar lo conocido, como hace Galileo, sino como medio de eliminar todos menos uno de los mecanismos que la imaginación sugiere para explicar un fenómeno determinado. Y tal como correctamente manifestó Descartes, la imaginación es dirigida porque se la remite a ciertos principios conocidos (o constructos) y, además, porque los mecanismos sugeridos deben, en primer

33. Galileo, *Dialogue* (en nota 7). p. 60.
34. *Discourse on method Part VI.*

lugar, ser susceptibles de comprobación deductiva, toda vez que la ciencia no permite conjeturas inútiles. Si Descartes se hubiera percatado de que incluso cuando sólo un único mecanismo hipotético parece deductivamente factible este mecanismo sigue siendo hipótesis hasta que es confirmado por experimentos, y si hubiera aplicado esta prueba más meticulosamente, su pensamiento hubiera estado menos expuesto a extenderse en especulaciones erróneas. En todo caso, la libertad de expresar hipótesis (a pesar del famoso aforismo de Newton), con la rigurosa atención a los resultados de los experimentos y la observación que el propio Descartes descuidó en su examen enciclopédico de la naturaleza, demostraría ser un factor creativo en el progreso acelerado de la ciencia.

Cabría hacer otra observación. Aunque la física de los *Principia philosophiae* de Descartes era amatemática, reveló, al igual que su *Dióptrica*, la posibilidad de matematización. En una teoría cinética, cuya base fuera la redistribución continua del movimiento (o *momentum*) entre las partículas a consecuencia del choque, en principio habría sido posible computar los cambios a gran escala en el movimiento —esto es, en los fenómenos— a partir de la redistribución entre las partículas, una vez conocidas las leyes sencillas de la distribución del *momentum* entre pares de partículas que chocan. Este tema lo abordaron, por considerarlo el fenómeno mecánico fundamental, Galileo, Descartes, Huygens, Christopher Wren, John Wallis, Borelli y Newton. Se averiguaron las leyes del cambio de *momentum*, pero en todo el siglo XVII no se intentó siquiera aplicarlas a un número casi infinito de choques entre partículas. El método estadístico de abordar semejantes problemas no se percibió nunca y, por lo tanto, el principio cartesiano de la conservación del movimiento siguió siendo estéril, a diferencia del principio de la conservación de energía en el siglo XIX. Pero el ideal consistente en integrar de modo matemático la física y la mecánica se comprendió claramente, aunque fuera un ideal ajeno a la realidad antes de Newton, que lo realizó trasladando la base de acción desde la redistribución del movimiento hasta la acción de la fuerza, abriendo así el camino que iba del caso simplista de un solo par de partículas a la consideración física de cuerpos brutos que contenían un número casi infinito de partículas. Newton haría que fuese cuantificable la integración de la acción que en la física cartesiana fue siempre especulativa.

El método científico del siglo XVII no puede atribuirse a un solo

origen. No lo desarrolló lógicamente un solo filósofo y tampoco fue ejemplificado por completo en una sola investigación. Hasta es dudoso que hubiera algún procedimiento tan consciente y definido que sea posible describirlo fuera del contexto de ideas con el que estaba relacionado. La actitud de los científicos del siglo XVII ante la naturaleza —especialmente su tendencia casi uniforme a la filosofía mecanicista— no formaba estrictamente parte de su método científico; pero, ¿puede analizarse de algún modo salvo en relación con la idea de la naturaleza? En gran parte el carácter del método lo determinó el alcance de la inteligencia de los hombres que lo aplicaron; de aquí que el método de Bacon diera menos frutos en manos del propio autor debido a que su concepto de los datos de la naturaleza seguía siendo aristotélico. Asimismo, si la influencia de Descartes fue tan grande, se debió a que produjo un sistema mecanicista del mundo de alcance infinito (enriquecido con algunos descubrimientos genuinos), sistema que fue bien acogido por su época, y no a que delinease una forma especialmente clara o satisfactoria de proceder en la investigación científica. Incluso las observaciones de Galileo sobre el método eran probablemente menos importantes que la imitación directa del tipo de análisis matemático que él inició en la mecánica. En el amplio campo de la actividad científica fue más significativa la influencia del contenido sobre la forma que el efecto contrario. Los métodos cambiaban porque se formulaban preguntas diferentes y empezó a imperar un nuevo concepto de lo que constituye el tipo más útil de conocimiento científico. Tal vez donde con mayor eficacia se revela este hecho sea en las ciencias biológicas, en las que el siglo XVII fue testigo de un cambio progresivo del contenido de las investigaciones sin el acompañamiento de análisis conscientes de los métodos que debían emplearse. No había aquí ningún paralelismo con la crítica de los métodos de Aristóteles y los escolásticos en la física, aunque, por supuesto, el descuido de las ciencias descriptivas en la Edad Media solía ser objeto de comentarios adversos. La interacción trascendental entre el contenido y las técnicas de la ciencia tampoco era controlada por conceptos muy explícitos del método. Esta interacción surtió un efecto profundo en la calidad y el alcance de la información disponible; pero sólo Bacon reconoció explícitamente la importancia que tenía la precisión al recopilar datos en la ciencia. Parece de lo más natural creer que en cualquier paso eficaz el método, la filosofía y el descubrimiento mismo se vieron arrastrados juntos por la reper-

cusión subsiguiente, porque, si bien no hay nada en las obras de Harvey, Kepler o Gilbert que podamos calificar razonablemente de «método científico específico», estos hombres cambiaron el carácter y la forma de los estudios futuros. ¿Quién, por ejemplo, podría hacer caso omiso del desafío que contiene la frase con la que Gilbert inicia su prefacio a *De magnete*: «Pruebas más claras, en el descubrimiento de secretos, y en la investigación de las causas ocultas de las cosas, siendo proporcionadas por experimentos fidedignos y por argumentos demostrados, que por las probables conjeturas y opiniones de los profesores corrientes de filosofía...»? Sin embargo, el significado y el peso del testimonio experimental seguían siendo debatidos un siglo después. El enfoque científico de los problemas debe ser la suma de sus numerosos aspectos —experimentación, análisis matemático y conceptual, precisión cuantitativa, etcétera— variando según la naturaleza del problema; y en el siglo XVII esto se sacaba de muchas y variadas fuentes. Su implícita ejecución en la práctica era más importante que su formulación explícita, con el resultado un tanto curioso de que el método científico, amoldándose a las necesidades de los científicos en ejercicio y vindicado por los resultados más que por un rigor lógico preconcebido, ha seguido teniendo algo de enigma para los filósofos de Berkeley en adelante. A la larga, el empirismo obstinado de un Gilbert o la intuición imprevisible de un Faraday han conseguido romper las reglas tanto de la lógica inductiva como de la lógica matemática.

CAPÍTULO 8

LA ORGANIZACIÓN Y EL PROPÓSITO DE LA CIENCIA

La filosofía y la ciencia han florecido siempre en su propio contexto, cambiando de época en época, y en formas institucionales determinadas. En las civilizaciones más antiguas todo el saber, y especialmente la astrología y la medicina, floreció en los templos asociado con la religión: los cultos médicos atraían a muchos enfermos en Grecia y Roma y, de hecho, siguen atrayéndolos en nuestros tiempos. Las más antiguas instituciones seculares del saber existían en Grecia: la Academia de Platón, el Liceo de Aristóteles (continuado por su discípulo Estratón), la gran Biblioteca de Alejandría, que duró muchos siglos. Escuelas y universidades fundadas en la Edad Media siguen enseñando, por mucho que haya cambiado su estilo. Finalmente, la sociedad culta y la academia, cuerpos que existen para promover la ciencia y el saber, así como para dar aliento a sus protagonistas, se crearon a principios de los tiempos modernos. Su evolución estuvo estrechamente vinculada a la de la ciencia, entre otros motivos porque la idea de un *instituto de investigación* era ante todo mucho más científica que literaria o humanística. Su función principal no consiste en enseñar y no cobrar honorarios; su propósito es aumentar el conocimiento más que difundirlo; el instituto de investigación lo forman tanto un edificio con las apropiadas instalaciones materiales como un equipo que normalmente trabaja en pos de alguna meta científica común bajo el liderazgo de su director. Tiene precedentes no europeos más antiguos, pero el primer instituto de investigación de la Europa moderna fue sin duda el observatorio de Tycho Brahe en Uraniborg (p. 209). No es de extrañar que los primeros

ejemplos surgieran en la astronomía, siendo el segundo el Observatorio de París bajo la dirección de Jean-Dominique Cassini (1625-1712). Tal vez a continuación deberíamos citar el Arsenal de París en tiempos de la Revolución Francesa. Hasta el siglo XIX no se hizo patente la realidad del instituto de investigación como forma científica característica, aunque, como veremos pronto, la idea se presentó con frecuencia antes de entonces.

Desde el siglo XVI hasta el XVIII la forma habitual de agrupamiento culto y científico era más libre, más discursiva y voluntarista. En 1700 sólo las academias Francesa y de Berlín se componían de miembros asalariados. También era escasa la investigación determinada y financiada institucionalmente: las academias y las sociedades existían para estimular la investigación incitando a los individuos a emprenderla particularmente, para premiar a aquellos cuyos esfuerzos llegaban a buen puerto y para comunicar los datos obtenidos. También servían, a escala modesta, como vehículo del estado para mostrar su interés por cuestiones científicas o técnicas como, por ejemplo, la navegación marítima. A finales del siglo XVII la mayoría de los hombres que participaban en el movimiento científico pertenecían a esta clase de instituciones, que también comenzaban a publicar revistas para diseminar informes y críticas. Para entonces las academias y sociedades ya se habían ganado un prestigio considerable: en la ciencia disfrutaban de un prestigio mucho mayor que el de las universidades... y atraían más censuras. En cierta medida se beneficiaron del hecho de que las universidades no conservaran durante el Renacimiento aquel liderazgo en todas las cuestiones filosóficas, científicas y médicas que habían establecido durante la Edad Media, lo cual puede que esté a su vez relacionado con el extraño hecho geográfico de que las universidades antiguas raramente se encontraran en las grandes ciudades cortesanas (con excepciones tan obvias como París y Viena). En la comunidad del saber medieval el erudito había gozado de libre comunicación con los miembros de otras universidades, desde Cracovia hasta Salamanca, y era normal que los eruditos se desplazasen a otras ciudades con el objeto de escuchar a los mejores maestros. En el siglo XVI hizo su aparición el fenómeno nuevo de unos eruditos, poetas y filósofos cuyas inquietudes ya no se enmarcaban en la pauta de los estudios académicos y que florecían al servicio de algún príncipe

o en las profesiones liberales.[1] El noble y el mercader cobraron importancia como mecenas de la cultura, a la vez que médicos, soldados, boticarios, abogados y comerciantes empezaban a contribuir al progreso de la misma. Ya no era especial saber latín y griego para adquirir un poco de cultura y, como el número de lectores en lengua vernácula especialmente aumentó con rapidez durante el siglo XVI, floreció el mercado de libros de matemáticas y de filosofía escritos en la lengua hablada (cual es el caso de los de Galileo y Descartes): así, pues, en el norte de Europa (ya que allí las universidades eran más escasas y tardaban más en moverse con los tiempos) el liderazgo marcadamente intelectual empezó a pasar a un grupo que, si bien temía por lo general una educación universitaria, había pasado del mundo académico a otro más ancho. No es raro que los estudios antiguos fueran objeto de las burlas de los radicales jóvenes:

Oxford y Cambridge nos hacen reír
su saber no es más que pedantería;

escribió el autor de la *Ballad of Gresham College*, añadiendo típicamente que «Aristóteles es un asno para Epicuro». (Con todo, las bromas se volverían contra los modernos en el *Hudibras* de Samuel Butler y *Los viajes de Gulliver* de Jonathan Swift.)

Por otra parte, hacia finales de la Edad Media había comenzado a aparecer un grupo de «artesanos cultos», muchos de los cuales sabían leer y escribir (algunos en latín) y otros sabían también matemáticas. Como líderes de este grupo los ingenieros (el más famoso de ellos es Leonardo da Vinci) se eligen a sí mismos; otros eran farmacéuticos, metalistas (como Cellini), agrimensores y navegantes, ensayadores de metales preciosos y artilleros. Estos hombres no solamente ejercitaban alguna habilidad técnica, sino que también escribían libros, en los que de vez en cuando se inspiraban hombres que, como Galileo o William Gilbert, tenían una perspectiva más filosófica. Algunos de los que ejercieron técnicas, al menos duratne parte de sus vidas (como Thomas Digges y Thomas Harriot), fueron también figuras importantes en la evolución de la ciencia, y otros muchos fueron cuando menos cuasicientíficos. Ayudaron a formar un ambiente social

1. Por supuesto, hubo excepciones anteriores: Petrus Peregrinus (Pierre de Maricourt, 1269) era soldado, Geoffrey Chaucer (que escribía en inglés sobre astronomía técnica *c*. 1390) era cortesano, funcionario y poeta.

e intelectual que los filósofos de la naturaleza y los matemáticos empezaron a encontrar agradable: a veces un gran noble era mecenas de hombres de los tres tipos. A mediados del siglo XVII todo el mundo reconocía que las escuelas de humanidades y las universidades no proporcionaban la única educación valiosa, en especial porque las escuelas y las universidades solían estar bajo el control (en el continente) de órdenes religiosas conservadoras, al mismo tiempo que la modernización de las enseñanzas universitarias resultaban un proceso penosamente lento. El conocimiento científico ya no estaba restringido a los religiosos y los médicos, sino que se hallaba ampliamente difundido en una sociedad diversificada y exuberante. Muchas crónicas autobiográficas describen la alegría que experimentaba un joven al pasar de la aburrida esterilidad de la educación oficial al conocimiento de la nueva filosofía y las nuevas matemáticas. Como en el caso de la experiencia casi mística que Descartes vivió en Baviera, la conversión de Galileo al sistema copernicano o el «redescubrimiento» independiente de la geometría euclidiana por parte de Pascal, la adopción de los puntos de vista y métodos modernos fue muy individual, ya que tanto la instrucción como la tradición se inclinaban en sentido contrario; pero, naturalmente, los que adquirían gustos intelectuales nuevos e independientes se unían espontáneamente o los unía el mecenazgo. Inevitablemente, los grupos no oficiales tendían a buscar estabilidad, aliento y privilegios. Del mismo modo que en el siglo XV los eruditos se habían agrupado alrededor de los Médicis en Florencia, también los últimos Valois de Francia apoyaron una «Academia» o, mejor dicho, unas academias, en cuyos debates se pasaba de la poesía a las matemáticas y al sistema copernicano. El saber era también un aspecto de la vida en la corte o en el seno de una familia importante en los círculos relacionados con sir Walter Raleigh y Henry Percy (1564-1632), el «conde brujo» de Northumberland (la mayor parte de su brujería consistía, al parecer, en haber protegido a matemáticos como Harriot). En Roma el experto en óptica y magia Giambattista Porta (muerto en 1615) reunió a un grupo de colegas y discípulos en la llamada Academia de los Secretos de la Naturaleza. Todos estos grupos fueron demasiado efímeros y caóticos para que podamos considerarlos como sociedades en el sentido moderno del término; también eran muy restringidos y privados, como, por ejemplo, el más famoso de este primer grupo, la Accademia dei Lincei (se llamaban a sí mismos «linces» por su perspicacia). Los linces llegaron a ser

relativamente numerosos: treinta y dos; y trazaron planes ambiciosos para sus actividades institucionales. Los planes nunca se hicieron realidad y no puede decirse que la asociación tuviera una existencia corporativa; se trataba más bien de un grupo de individuos seleccionados por el fundador, el príncipe Federico Cesi. Galileo fue el más destacado de los primeros linces.

También hay antecedentes remotos, por ejemplo en la *Utopía* de Moro, del sistema alternativo consistente en la vida y la actividad comunales: un grupo de hombres, tal vez con habilidades que se complementaban unas a otras, trabajaban juntos en pos de un objetivo común. Si damos a esto el nombre de «colegio experimental», vemos en ello la persistente idea medieval de la comunidad culta, que ahora deja la escuela y el *scriptorium* para adoptar la idea del instituto de investigación, *La nueva Atlántida* de Swift contiene la clásica exposición de un ideal que obsesionaría al siglo XVII y sería satirizado en la Gran Academia de Lagado,[2] de Swift. La Casa de Salomón en la Nueva Atlántida está consagrada «al conocimiento de causas, y los movimientos secretos de las cosas; y a ensanchar las fronteras del Imperio Humano, a la realización de todas las cosas posibles», y si al lector de trescientos cincuenta años después le parece que Bacon, al imaginar el más extravagante arsenal de investigaciones de la naturaleza, no entiende el verdadero sentido del asunto, a los contemporáneos de Bacon les resultaba inmensamente inspiradora la idea misma de unos programas de investigación tan organizados y ricos como aquellos. La mera estipulación de que «Por cada invento valioso, erijamos una estatua al inventor y démosle una recompensa liberal y honorable» parecía un ideal luminoso, casi inalcanzable, de generosidad y prudencia. Bacon creía en verdad que el enorme reino del conocimiento natural era demasiado vasto para que un hombre se ocupara de él sin ayuda de nadie, mientras que concentrarse en una sola línea de investigación o aprovechamiento de una idea de la naturaleza probablemente daría resultados desequilibrados y miopes. El medio de combinar la pericia individual con la amplitud de miras consistía en emplear a muchos hombres en la misma tarea. Así, como más adelante diría Thomas Sprat ante la Royal Society, a los esfuerzos de los individuos precursores, por muy espléndido que

2. Sin embargo, se dice que los ejemplos que da Swift de la insensatez del saber tienen por modelo a Rabelais, aunque Swift les dio un sesgo contemporáneo.

fuera su genio, «preferimos la Fuerza conjunta de muchos Hombres». Y había también la gran ventaja práctica (que era cada vez más evidente) de que los investigadores podían compartir con provecho los aparatos raros y costosos como, por ejemplo, telescopios y espejos ustorios. Naturalmente, la influencia de Bacon fue más fuerte en Inglaterra, donde el apologista oficial de la Royal Society, Thomas Sprat, expresó en 1667 la opinión de que en los escritos de Bacon estaban «por doquier esparcidos los mejores Argumentos que pueden aducirse para la Defensa de la Filosofía experimental, y las mejores Instrucciones que se necesitan para promoverla»; la Accademia del Cimento (academia de experimentos) de Italia, fundada en 1657, a la que suele considerarse como la primera academia científica oficial, obtuvo su inspiración de fuentes mucho más cercanas a ella, a saber, de Galileo y su colaborador Evangelista Torricelli (1608-1647), que se había quedado en Florencia después de la muerte de Galileo. El espíritu impulsor de la citada academia era el príncipe Leopoldo de Médicis, hermano del gran duque Fernando II, sobre el cual ejercía mucha influencia. Contando con tan augusto respaldo, los académicos pudieron reunir la mejor colección de equipo científico jamás vista en Europa, gran parte del cual se conserva todavía.[3] Los académicos eran sólo nueve, pues se trataba decididamente de una academia cortesana, dependiente de los caprichos de sus protectores, caprichos que aspiraba a satisfacer, y nunca logró formarse un programa de investigación científica a largo plazo y coherente, aunque entre sus miembros se contaban algunos de los talentos científicos más distinguidos de la Italia de entonces: Vincenzo Viviani (1622-1703), que de todos los hombres en vida era quien mejor había conocido a Galileo, Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), hombre de muchas y variadas realizaciones, Francisco Redi (muerto en 1697), cuyos estudios de los insectos ya hemos mencionado, y (brevemente) Nils Steno (1638-1686), nacido en Dinamarca. La academia empezó poco después de que Borelli llegara a la universidad de Pisa, procedente de Sicilia, y se derrumbó al poco de marcharse él, pero se habían mostrado experimentos en la corte antes de 1657 y *Los nobles hermanos* siguieron manteniendo laboratorios personales incluso después de la desaparición de la academia diez años más tarde.

La forma más fácil de resumir un amplio y misceláneo conjunto

3. En el Museo di Storia della Scienza, Florencia.

de trabajos, consignados en las *Saggi* de la academia publicados en 1667,[4] consiste en decir que recapituló y demostró experimentalmente la labor científica de Galileo, Torricelli y Viviani. Hubo una larga serie de experimentos neumáticos, muchos otros relativos al calor y al frío, así como al sonido; experimentos sobre el movimiento de los cuerpos, el magnetismo, la electricidad y otros temas variados. La academia no empleaba una bomba de aire; en su lugar, las pruebas se realizaban en el espacio «vacío» creado por el descenso de una columna de mercurio, como en un barómetro. Se realizaron trabajos extensos y extraños relacionados con los termómetros y otros instrumentos que requerían un exquisito soplado del vidrio. Todo ello se registraba anónimamente bajo una etiqueta de lo más positivista: hay que advertir al lector de las *Saggi* que si en ellas encuentra alguna especulación, ésta debe «tomarse siempre por los pensamientos y el sentido particular de alguno de los Miembros, pero no debe imputarse a toda la Academia, cuyo único Designio es hacer *Experimentos* y relatarlos». De aquí que, si bien la academia confirmó algunas opiniones modernistas —como, por ejemplo, la de la presión atmosférica—, hiciera poco por formar la estructura teórica de la ciencia moderna, que más bien se desarrolló en asociación con investigaciones análogas llevadas a cabo (por ejemplo, en neumática) por Blaise Pascal en Francia y Robert Boyle en Inglaterra. Los teoremas de Galileo sobre el movimiento de los proyectiles fueron verificados por medio de pruebas, en la medida en que ello era posible; las propiedades cronométricas del péndulo fueron estudiadas y (tras la aplicación independiente del péndulo a los relojes por Christiaan Huygens en 1657) se exhumó el frustrado pero factible proyecto de un reloj que hiciera Galileo. La «radiación» de frío a partir del hielo, la incomprensibilidad del agua, el paso de la virtud magnética (pero no del sonido) a través del vacío experimental, y la atracción capilar, todo esto se investigó concienzudamente; no todos los temas eran nuevos. Puede decirse que los orígenes del laboratorio físico se remontan a la Accademia del Cimento.

Por desgracia, a causa de las deficiencias de las comunicaciones

4. Traducidas al inglés por Richard Waller bajo el título de *Essayes of natural experiments made in the Academie del Cimento* (1684), aunque la palabra *Saggi* no se traduciría por «pruebas» o «ensayos» en este contexto. Véase W. E. Knowles Middleton, *The experimenters: a study of the Accademia del Cimento*, Johns Hopkins University Press, Londres y Baltimore, 1971.

sólo vagos rumores de las actividades de la corte toscana cruzaron las fronteras de Italia antes de la publicación de las *Saggi*, y cuando esta crónica empezó a leerse la ciencia experimental ya estaba bien asentada en Francia e Inglaterra, donde encontró un clima más propicio. El laudable intento de perpetuar la tradición galileana en Florencia era totalmente contrario a la corriente generalizada de reacción clerical en Italia, la cual haría que incluso los investigadores más respetados, como Malpighi, anduvieron con pies de plomo.[5] Puede que el entusiasmo del príncipe Leopoldo por la ciencia disminuyera cuando lo nombraron cardenal; Borelli y otros dos miembros de la academia decidieron marcharse de la Toscana; uno de estos dos, Antonio Oliva, pronto (1668) se quitaría la vida en la cárcel de la Inquisición en Roma; Steno abandonó la ciencia después de convertirse a la fe católica. Estos hechos demuestran la tónica imperante a la sazón, aunque en Italia siguió habiendo cierto vigor científico, sobre todo en una tradición ininterrumpida que existía en Nápoles (representada ahora por Tommaso Cornelio) y en el grupo cada vez más numeroso de hombres que cultivaban la astronomía y la microscopia en Bolonia.[6] Esta ciudad tenía sus propios círculos científicos: en el decenio de 1660 existía en ella una Academia Filosófica, que adquiriría vida nueva a finales de siglo y sería formalizada en 1714.

El entusiasmo por la nueva filosofía —que en Inglaterra típicamente expresaron los médicos y párrocos rurales, así como los hacendados, vinculados de un modo algo tenue por el trato y la correspondencia— en Italia y Francia, donde las tradiciones de actividad cultural urbana eran más fuertes, estimuló la formación de sociedades efímeras pero discernibles como esta de Bolonia, y otras en Nápoles, Caen, Rouen, Castres y Montpellier. En Italia la existencia de muchas universidades promovió tales asociaciones: en el sudoeste de Francia el protestantismo constituyó un vínculo complementario. Pero el rasgo más característico de los movimientos científicos, tanto en Inglaterra como en Francia, es la dominación de la ciudad capital, aun cuando había muchos hombres de talento en las provincias, porque ambas sociedades, la inglesa y la francesa, estaban estrechamente vinculadas a a corte. La Real Academia de Ciencias de París la com-

5. Maurizio Torrini, *Dopo Galileo*, Olschki, Florencia, 1979.

6. Los astrónomos eran J. D. Cassini (1625-1712, futuro director del Observatorio de París), Eustachio Manfredi (1674-1739) y Geminiano Montanari (1633-1687). Todos ellos gozaban de reputación internacional.

ponían los pensionados del rey, mientras que la londinense Royal Society se encontraba siempre a la espera de una subvención real que nunca recibía. Quizás uno de sus privilegios más sólidos consistía en que su correspondencia con el extranjero se realizaba por medio de la valija diplomática, pues el intercambio de noticias, libros y publicaciones, no sólo dentro de un mismo país, sino también entre países constituye un barómetro de salud intelectual que se estaba desarrollando rápidamente en las postrimerías del siglo XVII. Como los servicios postales corrientes dejaban mucho que desear, sobre todo en lo que se refiere al transporte de paquetes, a menudo la comunicación dependía del tránsito de viajeros y de los cauces diplomáticos. Tycho Brahe, Galileo y Kepler son los primeros científicos de cuya correspondencia se conserva un volumen considerable; luego, a partir de 1640 más o menos, esta clase de material se hace copiosísima. Este fenómeno es muy notable en el caso del grupo francés de mediados de siglo (Descartes, Gassendi, Fermat, Roberval, Pascal) y especialmente en el de aquel enérgico corresponsal que fue Marin Marsenne. Desde su casa religiosa de la Place Royale de París, que era también, al parecer, escenario de debates frecuentes aunque no oficiales, Mersenne propagaba con energía noticias y críticas entre sus amigos. En una época en que los viajes proporcionaban pocas oportunidades de contactos personales directos, en que no circulaban periódicos y publicaciones eruditas (aunque estas últimas aparecerían en 1660), este sistema privado de resumir los últimos libros publicados, de dar cuenta de nuevos experimentos o de la crítica de Fulano a la obra publicada por Mengano, o simplemente de decir quién hacía qué y dónde lo hacía, desempeñó un papel importantísimo, ya que minimizó el aislamiento de los individuos al mismo tiempo que creaba un verdadero movimiento científico con su *momentum* y sus normas propios. Los que se veían dolorosamente afectados por las críticas que recibían de este modo (o, más aún, por la noticia de que no habían descubierto nada nuevo) solían dedicar epítetos como «noticieros», «mercaderes de la filosofía» o cosas peores a quienes hacían de la correspondencia un negocio, pero lo cierto es que estos hombres fundaron una comunidad científica internacional y fueron los precursores de la publicación científica.

Después de Mersenne los más importantes de ellos fueron otro parisiense, Henri Justel (1620-1693), que oficialmente era uno de los secretarios del rey, pero en la práctica era una especie de Fígaro en

los círculos científicos franceses, un hombre que conocía a todo el mundo y lo sabía todo y que durante mucho tiempo fue el extremo francés del vínculo entre Londres y París; Henry Oldenburg (1618?-1677), que desde 1662 hasta el fin de sus días fue el dirigente secretario de la Royal Society y en 1665 empezó a publicar las *Philosophical Transactions, giving some Accompt of the present Undertakings, Studies and Labours of the Ingenious in many considerable Parts of the World*; y John Collins (1625-1683), modesto funcionario del gobierno inglés y entusiasta de las matemáticas que se impuso a sí mismo la tarea de tener a los matemáticos despabilados y ocupados. De estos tres hombres Oldenburg, que era alemán de nacimiento y en 1653 se afincó permanentemente en Inglaterra, fue con mucho el más importatne debido a su cargo, a su laboriosidad infatigable y a su gran sentido común. Tenía, por lo general, buen ojo para descubrir cosas de interés perdurable, entendía el programa baconiano y procuraba que se cumpliese a escala internacional y percibía la necesidad de convertir el bosquejo para un buen trabajo en un «programa de investigación» en el que pudieran colaborar muchos. Oldenburg no sólo hizo que las ambiciones y los logros de la Royal Society fueran conocidos en el extranjero, sino que, además, cuidó de que dicha institución estuviera informada en todo momento de los progresos que se hacían en el continente.

La isla que produjo a Bacon, Napier, Gilbert, Harvey, Harriot y Briggs produjo también mucha originalidad y talento durante los dos primeros decenios del siglo XVII; pero parte de este talento quedó cuando menos medio escondido y sus poseedores eran individuos aislados, que ignoraban sin querer o a propósito la labor de sus colegas. Un viajero observador hubiera pensado que el genio inglés se inclinaba por la poesía y la música más que por la ciencia, y aunque de las universidades salían numerosos jóvenes brillantes, estas institucione eran muy aburridas y atrasadas. El principal foco de interés científico era el Gresham College, inaugurado en 1597 por deseo de un importante mercader de Londres en su propia casa de la ciudad. El objetivo del College consistía en poner la cultura al alcance de los ciudadanos por medio de conferencias en lengua vernácula, ya que Londres carecía absolutamente de vehículos parecidos para la adecuación de personas jóvenes o maduras. Las asignaturas eran tradicionales: las ciencias matemáticas de la geometría, la astronomía y la

música; la retórica o ciencia de la expresión; y los tres estudios profesionales: teología, derecho y medicina. Sir Thomas Gresham no se había formado ningún concepto modernista utilitario o progresista de los conocimientos que debían impartirse en las conferencias que llevaban su nombre. En los casi cuatro siglos de su existencia —pues las conferencias Gresham siguen celebrándose— el College ha destacado más por el hecho de sobrevivir que por su calidad intelectual: los profesores chapucearon sus obligaciones desde el principio. Algunos hombres notables enseñaron en el College: en geometría, Henry Briggs (1556-1630), popularizador y casi podríamos decir que segundo inventor de los logaritmos; Isaac Barrow (1630-1677), primer «Lucasian Professor» de matemáticas en Cambridge y patrón de Newton; y Robert Hooke (1635-1703); en astronomía sobresalió especialmente Christopher Wren (1632-1723); la influencia de hombres como estos, aunque fuera sólo durante un breve período, a veces era decisiva para otros. Asimismo, en «Gresham» se juntaron hombres de gustos matemáticos y científicos, convirtiéndose en el foco natural para el club. La Royal Society y el Gresham College estarían inseparablemente unidos hasta los últimos años de Newton.

Como hemos comentado antes, los capitanes de mar y los navegantes de Londres procuraban perfeccionar sus conocimientos de geografía, cartografía y navegación desde los comienzos del reinado de Isabel; John Dee había sido el más conocido de sus mentores. Humphrey Gilbert había buscado un establecimiento donde se enseñasen ciencias matemáticas prácticas a «los pupilos de su Majestad, y otras a la juventud de la nobleza y los caballeros» en 1572. Dee buscaba algo parecido y lo mismo hacía, con igual falta de resultados, Richard Hakluyt, recopilador de los *Voyages*. Sin embargo, la amenaza de la llamada Armada Invencible en 1588 inspiró la fundación de una Cátedra de Matemáticas en Londres, cuyo titular fue Thomas Hood (*c.* 1560-1598) hasta cerca de 1595. La misma atención a lo práctico siguió siendo fuerte en el Gresham College, especialmente en la persona de Edmund Gunter (1581-1626). Aparte del Colegio de Médicos, con el cual estaba asociado William Harvey, como es natural, probablemente éste fue el grupo científico más fuerte de Londres durante los primeros años del siglo XVII. Se sabe con certeza que a las conferencias asistían jóvenes que trababan relación personal con los profesores. Sin embargo, es mucho más dudoso que en el Gres-

ham College se celebrasen reuniones o debates regulares casi desde el principio.[7]

Según la mejor narración casi contemporánea que relacionaba el Gresham College con la Royal Society, la de John Wallis (1616-1703), el matemático de Oxford, estas reuniones no se remontan más allá de 1645 y llegan hasta el final de la primera guerra civil de Inglaterra:

> Por común acuerdo, varios de nosotros nos reuníamos semanalmente en Londres, en cierto día y a cierta hora, bajo cierta pena, y una aportación semanal al coste de los experimentos ... de los cuales formaban parte el doctor John Wilkins ... el doctor Jonathan Goddard, el doctor George Ent, el doctor Glisson, el doctor Merrett (doctores en Medicina), el señor Samuel Foster ... el señor Theodore Haak ... (quien, creo, fue el primero en sugerir estas reuniones) y muchos otros.

Wallis recuerda también que el grupo se reunía en el alojamiento del doctor Goddard, porque éste tenía un «operario» que ayudaba en los experimentos, o en las conferencias del señor Foster: ambos hombres eran profesores del Gresham: el primero de medicina, el otro de astronomía; o se encontraban en la Bull Inn de Cheapside.

Aparte de este círculo, del que volveremos a ocuparnos, había otros que también participaban en el movimiento científico nacional. En el norte había un grupo de astrónomos cuya figura más destacada era Jeremiah Horrocks (1618-1641), que pasó la mayor parte de su vida cerca de Liverpool. Fue uno de los primeros en utilizar con eficacia el telescopio para las observaciones, registrando singularmente el tránsito de Venus en 1639. Aún más importante fue su ampliación de la teoría elíptica del movimiento planetario, de Kepler, y la corrección de las tablas del mismo autor: fue el primer astrónomo que trató la órbita de la Luna como elíptica. William Gascoigne (*c.* 1612-1644), natural de Yorkshire y vinculado a Horrocks por su común amigo William Crabtree, también era conocido de Christopher Towneley de Lancashire, que conservó los papeles de todo este grupo. Gascoigne fue el primero en utilizar el telescopio en instrumentos prfeccionados para la medición angular; el micrómetro que él inventó lo entregaría a la Royal Society el sobrino de Christopher, Richard

7. F. R. Johnson, *Astronomical thought in Renaissance England*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1937; su visión de Gresham es demasiado halagüeña.

Towneley (1629-1707), transcurridos más de veinte años de la muerte prematura de Gascoigne. Durante la Restauración este Towneley más joven también trabajaría con el filósofo de la naturaleza Henry Power (1623-1668) de Halifax, el primer microscopista inglés, y con John Flamsteed (1646-1719), que publicaría la teoría lunar de Horrocks y sería el primer Astrónomo Real. Su hogar estaba en Derby.

Esta pequeña red de relaciones personales (que se extendió a lo largo de unos cincuenta años) la hemos descrito —con algunas omisiones— como ejemplo del tipo de vinculación personal entre los cultivadores de la ciencia y las matemáticas que existía en varias partes de Inglaterra y, por supuesto, también en otros países. En este grupo de astrónomos del norte —que se apartaban de la norma imperante a la sazón, ya que tendían al monarquismo en política y al catolicismo en religión— no había ninguna figura dominante. No ocurría así en el caso de un segundo grupo que había en Londres, distinto del descrito por Wallis, y que se reunía en torno a Samuel Hartlib (muerto en 1662), que era un protestante alemán refugiado en Inglaterra, al igual que su amigo Theodore Haak, al que menciona la narración de Wallis y, en cierto sentido, Henry Oldenburg también. Quizás el mejor calificativo que podríamos aplicarle a Hartlib es el de «filósofo social», puesto que no se mostró menos activo en las ciencias oficiales como la astronomía y la botánica. Fue uno de aquellos hombres valiosos y enérgicos que aparecen en cada generación y que creen que se instaurará un milenio secular con la sola condición de que se lleve a cabo una serie de reformas sencillas y obviamente deseables. En 1641 —cuando tendría cuarenta años y pico— describió el estado ilustrado del futuro en *A description of the famous kingdom of Macaria*: una de las sesenta obras y pico que publicó Hartlib (no todas salidas de su pluma) movido por su deseo de contribuir al bien común. Sus ideas sobre el modo de reformar la sociedad eran variadas y cambiantes; en la época en que publicó la obra citada esperaba mucho del programa del reformador checo John Amos Comenius, que abogaba por la educación y la paz universales, a quien hizo visitar Inglaterra (Comenius creyó equivocadamente que la invitación procedía del parlamento). Años después se interesó más por la agricultura y por inventos técnicos de índole muy variada. Desde el punto de vista político, Hartlib y sus colaboradores pertenecían al bando de los vencedores —parlamentarios y cromwellianos— y durante muchos años el propio Hartlib recibió

una pensión en ayuda de sus propósitos benéficos. Al igual que muchos otros grupos, como el de los «Levellers», cada uno a su manera, algunos con un entusiasmo religioso más definido que otros, consideraban la caída de la monarquía y de la iglesia oficial como señales del inicio de una era nueva y mejor: para algunos, el «Imperio de los Santos», para otros, la educación de las mujeres, o el sufragio universal, o el dominio del escurridizo movimiento perpetuo a fin de mitigar para siempre el trabajo de los hombres. La época en que los amigos de Wallis se reunían sobriamente en el Gresham College para hablar de la nueva filosofía era también la época de las visiones descabelladas y generosas, en cuya configuración intervinieron en cierta medida los escritos de Bacon. Estos baconianos reformadores no eran lógicos, como el propio Bacon, ni eran experimentadores científicos; quizás lo principal que sacaron de Bacon (acertadamente o no) fue la opinión de «que no valora ningún conocimiento salvo si tiene alguna tendencia al uso», citando las palabras que pronunció Robert Boyle en 1646.[8]

A pesar de esta falta de dirección firme, Hartlib llevaba consigo una atmósfera de inspiración, entusiasmo y optimismo que impresionaba a los políticos y a los intelectuales que trabajaban con ellos (como John Milton y John Pell, matemático y miembro fundador de la Royal Society), así como a hombres mucho más jóvenes como Boyle y William Petty, de quienes se oiría hablar mucho más. Durante la Commonwealth Hartlib albergó la esperanza de organizar a sus discípulos en una «Oficina de Direcciones» (Office of Address) subvencionada por el estado —un organismo internacional para la correspondencia y la invención— y, al no ver realizadas sus esperanzas, su círculo se extendió hasta abarcar a otro grupo pequeño cuyas principales figuras eran Boyle y Benjamin Worsley (*c.* 1620-1673); lo que más les interesaba eran las aplicaciones útiles de la química y la historia natural.[9]

8. Hartlib, sus colaboradores, sus tiempos, el baconismo y el empeño reformador a mediados de siglo más o menos se tratan detalladamente en Charles Webster, *The great instauration*, Duckworth, Londres, 1975.

9. El debate erudito en torno a la definición del significado de las palabras «Invisible College», que Boyle empleó en cartas de 1646 y 1647, ya no es provechoso, por lo que he evitado esta etiqueta en el texto. Es seguro que Boyle no se refería al grupo descrito por Wallis, ya que ignoraba la existencia del mismo. Conocemos la gama de colaboradores de Boyle en 1646-1647. Antes o después Hartlib se interesó mucho por los esfuerzos de todos ellos, incluyendo a Boyle. Un utopismo de elevados senti-

Está claro que Londres era terreno fértil para el crecimiento de la planta científica. En general, parece que los hombres con quienes se relacionaba Wallis en el Gresham College sobrevivieron a la Restauración de 1660 y figuraron en la Royal Society; eran también «académicos», esto es, médicos, anatomistas, matemáticos, astrónomos, botánicos. Con las notables excepciones que ya hemos mencionado, los amigos de Hartlib, comprometidos más sinceramente con los ideales puritanos y la innovación social, tuvieron peor suerte después de 1660 y no llegaron a ser miembros de la Royal Society: se habían interesado por cosas prácticas, no académicas. Uno de ellos era Johann Sibertus Küffeler, yerno del inventor holandés Cornelius Drebbel que durante muchos años fue consultor técnico de la marina inglesa. También Küffeler fue invitado a visitar Inglaterra por el Consejo de Estado con el fin de que hiciera una demostración de su torpedo destructivo, el cual impresionó mucho a Cromwell en el último año de su vida. En un terreno más pacífico, Küffeler dirigió la producción del tinte llamado «escarlata» inventado por Drebbel —que durante tanto tiempo fue el color de los uniformes del ejército británico— e inventó el termostato para los hornos. Recibió gran apoyo de Hartlib, que opinaba que los terribles efectos de su invento eran tales «que la nación que sea la primera en poseerlo» podría «dictar la ley a otras naciones». A Küffeler no se le encontraría nunca en el círculo de la Royal Society.

A finales del decenio de 1640 y durante el de 1650 se creó en Oxford un nuevo centro de investigaciones, iniciado (como dice John Wallis en su narración) cuando se nombró a John Wilkins (1614-1672) director del Wadham College en 1648. Del grupo original del Gresham, Goddard y Wallis siguieron a Wilkins a Oxford antes de que transcurriese mucho tiempo; Robert Boyle se estableció allí en 1654; y el talento joven de la universidad se vio reforzado por multitud de hombres competentes: Seth Ward, Thomas Willis, William Petty, Robert Hooke, Richard Lower y muchos más. Wilkins, clérigo de profesión, poseía, al igual que Hartlib, la cualidad personal que le daría influencia sobre los demás, aunque su obra publicada era bastante trivial: *The discovery of a world in the moone* (1638) y

mientos parecido al del «Invisible College» estaba muy extendido, tanto entre los que conocían a Hartlib en 1646 como entre los que no le conocían. Véanse los artículos recogidos en *Notes and records of the Royal Society*, 23, n.° 2, 1968.

A discourse tending to prove that 'tis probable our Earth is one of the planets (1640) eran hábiles vulgarizaciones de Galileo. Robert Hooke, uno de los protegidos de Wilkins, daba las gracias a Dios porque «El doctor Wilkins era inglés, pues dondequiera que había vivido, allí había estado la seda principal del conocimiento generoso y la filosofía verdadera». Esta sede se encontraba en Oxford, según recordó Wallis, en los alojamientos primero de Petty, luego del propio Wilkins, y finalmente (tras la destitución del segundo) en los de Boyle. Algunos autores, incluyendo Thomas Sprat, el primer historiador de la Royal Society y otro de los protegidos de Wilkins, han visto en estas reuniones de Oxford «el fundamento de todo esto que ha venido después». Porque al llegar la Restauración, Wilkins, que estuvo brevemente en el bando contrario, se encontró sin empleo y de vuelta en Londres. La mayoría de los historiadores creen que, como dijo Wallis, las reuniones de Londres habían continuado durante el decenio de 1650, y que los dos grupos se unieron ahora para formar la Royal Society, en armonía con monárquicos que habían regresado tales como sir Robert Moray y lord Brouncker. El 28 de noviembre de 1660 doce hombres se reunieron en las habitaciones de Lawrence Rooke, profesor de geometría, en el Gresham College, después de una conferencia que dio Christopher Wren, profesor de astronomía, y allí decidieron oficialmente inaugurar «una forma más regular de debatir las cosas, y según la costumbre de otros países, donde había asociaciones voluntarias de hombres en academias, para el fomento de varias ramas del saber»; la nueva sociedad se reuniría semanalmente e invitaría a otros a unirse a ellos.[10] Así nació la Royal Society, aunque no recibió sus estatutos hasta 1662, de manos de Carlos II.

El Journal-Book o diario que acabamos de citar deja bien claro que los doce fundadores conocían los precedentes extranjeros. Es casi seguro que habían tenido noticia de la Accademia del Cimento de Florencia a través de personas que recientemente habían viajado por el extranjero, como, por ejemplo, Henry Oldenburg y Robert Southwell, y que en los libros habían encontrado alusiones a grupos italianos anteriores, como los Linces. Pero tal vez pensaban principalmente

10. Entre los doce había cuatro *emigrés* que habían vuelto y por lo menos cinco hombres a quienes le había ido muy bien durante la república. Cuatro habían estado en Oxford. Dos (Wilkins y Goddard) figuran en la lista de Wallis correspondiente a 1645. Los otros dos (Boyle y Petty) habían estado estrechamente vinculados a Hartlib.

en París. Tanto Wilkins como Theodore Haak (a quien Wallis atribuyó la idea original de las reuniones de Gresham) habían cruzado correspondencia con Mersenne; Wilkins también conservaba sus contactos con Holanda. Lo más importante es que Oldenburg (que ahora era cliente de los Boyle, sobre todo de Robert) durante sus viajes por Francia había adquirido una visión detallada de la vida intelectual francesa y asistido a reuniones en París.

En Francia, al igual que en Italia, los intelectuales de clase media, que en Inglaterra se unieron para formar sus propios clubs, en los que se reunían en plano de igualdad, dependían más de los buenos oficios de un mecenas. Así, a principios de siglo XVII uno de los grupos parisinos más notables, en lo que hace a la literatura y el saber, se reunía regularmente en la residencia del historiador De Thou. Su patronazgo, que incluía la utilización de su valiosa biblioteca, lo continuaron sus parientes los hermanos Dupuy hasta cerca de 1662. Reuniones menos elevadas se celebraban en el Bureau d'Adresse dirigido por el periodista Renaudot. En ellas, al igual que en el gabinete de los Dupuy, las noticias literarias y políticas despertaban más expectación que el debate de temas científicos. El círculo de Mersenne, sin embargo, se ocupó casi totalmente de los asuntos matemáticos y científicos: fue Mersenne, por ejemplo, quien dio a conocer en Francia los descubrimientos de Galileo y sus discípulos, quien divulgó el sistema cartesiano y el problema de Pascal sobre la cicloide. Al fundar Richelieu la Académie Française, entre los que cultivaban las ciencias cundió la idea de que debía fomentarse también una institución parecida pero ajena a la literatura. Entre ellos estaba Habert de Montmor, hombre muy rico que había ofrecido su patronazgo tanto a Descartes (que lo rechazó) como a Gassendi. No mucho tiempo después de la muerte de Marsenne en 1648 se celebraban reuniones semanales en su casa, presididas por Gassendi. Los debates no estaban limitados a la ciencia, y lo único que se exigía era que los participantes sintieran «curiosidad por las cosas naturales, la medicina, las matemáticas, las artes liberales y la mecánica». La Academia Montmor, que en 1657 se dio a sí misma una constitución en regla, pronto se convirtió en un lugar de moda, como demuestra una reunión celebrada en 1658 durante la cual se leyó en voz alta la sensacional noticia de que Christiaan Huygens había elucidado la naturaleza del anillo de Saturno: la sala estaba llena de doctores de la Sorbona, nobles *abbés*, secretarios de estado, abogados,

funcionarios y otras personas de alto rango y distinción social, aparte de matemáticos, científicos aficionados y literatos.[11] La ciencia, incluso las matemáticas más abstrusas, se había vuelto respetable y, al parecer, interesante, incluso en los niveles superiores de la sociedad parisina. Las nuevas filosofías de Descartes y Gassendi se aliaron victoriosamente contra el aristotelismo. Pero la marcha de la academia no era del todo plácida; los aficionados estaban más dispuestos a comentar las últimas maravillas de la ciencia que a trabajar por fomentarlas, y se producían fuertes choques personales.

Mazarino, que había mostrado mucho menos interés por la eminencia intelectual de Francia que su amo Richelieu, murió en 1661 y el poder supremo pasó entonces al joven rey Luis XIV. Se presentó, pues, la posibilidad de adquirir para la ciencia al más grande de todos los mecenas. Desde que la Royal Society empezara a cobrar forma en 1660, la Academia Montmor había seguido sus peripecias con envidia y, en cierta medida, hasta había tomado las actas de la Royal Society como modelo de las suyas. Los vínculos entre las dos sociedades eran estrechos, ya que Oldenburg se escribía con varios miembros de la Academia Montmor. Huygens y Sorbière (el secretario de la academia) eran miembros de ambas agrupaciones y varios miembros de la parisina visitaron Londres.

Las obras de Boyle y de otros ingleses se estudiaban atentamente en París, donde la utilidad del empirismo iba apreciándose poco a poco. Sorbière señaló en 1663 la ventaja de la experimentación sobre las riñas verbales, pero opinó que «sólo los Reyes y los acaudalados gobernantes de unas cuantas repúblicas sabias y ricas pueden acometer la erección de una academia física donde habría una experimentación constante». Parece ser que los franceses quedaron aún más convencidos que los miembros de la Royal Society, que había crecido a partir de sus propios orígenes independientes y variados, de la necesidad de grandes subvenciones para que una sociedad experimental tuviera éxito. Hacia finales de 1664, cuando la Academia Montmor había caído a causa de la inanición, las rivalidades personales y la falta de dinero, Melchisédec Thévenot (1620-1692), viajero y polímata, inventor del nivel de aire, junto con los astrónomos Adrien Auzout y Pierre Petit, trazó un plan para una Compañía de Artes y Ciencias

11. Harcourt Brown, *Scientific organizations in seventeenth century France* (1620-1680), Williams and Wilkins, Baltimore, 1934, p. 84.

que era virtualmente un instituto de investigación dotado de laboratorios, observatorios, traductores, secretarios corresponsales, etcétera. Durante un tiempo el propio Thévenot intentó proporcionar una base para tales actividades en su domicilio particular, hasta que los gastos resultaron demasiado elevados. De los diversos subgrupos discordes que formaban el mundillo intelectual de París, entre los cuales había cartesianos, gassendistas, matemáticos, filósofos, astrónomos y experimentalistas, los dos últimos siguieron una iniciativa afortunada del gran ministro de Luis XIV Jean-Baptiste Colbert, que no ignoraba el precedente que Richelieu, su gran precursor, había sentado en el campo de las letras. Colbert ya protegía a distinguidos hombres de ciencias extranjeros. No le molestaron las propuestas que en nombre de la ciencia experimental le hicieron Sorbière, Auzout y Thévenot, cada uno por su cuenta. El esquema de una «Compañía» era muy complejo y fue recortado considerablemente, pero al final se decidió proporcionar los salarios de quince académicos divididos en dos clases: los matemáticos (incluyendo a astrónomos y físicos) y los filósofos de la naturaleza (incluyendo a químicos, médicos y anatomistas); se reunían en dos salas reservadas para ellos en la Real Biblioteca los miércoles y los sábados. La primera asamblea tuvo lugar el 22 de diciembre de 1666.[12]

Luis XIV tenía razones de estado muy serias para fundar la Academia de Ciencias, mientras que el favor que Carlos II dispensaba a la Royal Society tenía una base trivial. La Academia francesa se fundó para añadir lustre a la corona gala; el grabado oficial que representa la visita oficial de Luis XIV a sus académicos demuestra perfectamente este aspecto: toda excelencia, toda distinción, todo logro reciben su inspiración del monarca y reflejan sobre él una luz más fuerte. El rey debía ser el centro y el patrón de todas las actividades culturales que se desarrollasen en el estado. La Academia era un Versailles intelectual, otro marco para la corona. Además, Colbert, autoritario, mercantilista, precursor de la economía dirigida, sin duda se dejó convencer por la retórica utilitaria que los científicos experimentales emplearon para tentar su generosidad. En las técnicas de la guerra y la navegación marítima, de la construcción de buques, de la arquitectura y la ingeniería, cabía esperar que estos expertos

12. Roger Hahn, *The anatomy of a scientific institution: the Paris Academy of Sciences, 1666-1803*, University of California Press, Berkeley, 1971.

inventivos pondrían sus habilidades al servicio del estado y le proporcionarían así, en la manufactura y el comercio, además de en la guerra y las artes de la magnificencia, influencia sobre todas las demás naciones. De hecho, años después Colbert orientó a los académicos hacia las investigaciones de tal índole y ellos se sometieron de buen grado aunque con escasas ventajas lógicas para nadie. Existía también la idea de que la institución uniría los méritos respectivos de teóricos y prácticos en bien común de las artes útiles. Es difícil imaginarse al cínico Carlos II dejándose embaucar por semejantes pretensiones interesadas. El rey decidió invertir su dinero en los astilleros de Deptford en lugar de en el barco de doble fondo de sir William Petty. (Los franceses, en cambio, a finales de siglo pondrían sus astilleros bajo control externo y experto.) Por otra parte, Carlos II tomó medidas para que la Royal Society no le costase jamás ni un penique ni impusiera tediosas obligaciones a su real persona. Le divertía halagar inocentemente la vanidad de los escasos cortesanos que consideraban que la filosofía era un pasatiempo divertido: es probable que mostrara un interés verdadero pero caprichoso en algunas obras de ingenio como, por ejemplo, el reloj de Hooke y el telescopio reflector de Newton. Sin duda también encontraba divertido que le considerasen como mecenas aquellos que, de hecho, no recibían nada de él. Al hablar de la Royal Society lo hacía principalmente, según han registrado en sus crónicas Pepys y otros, como si se tratase de una comedia, con lo que ofendió gravemente al visitante italiano Lorenzo Magalotti, ex-secretario de la Accademia del Cimento, cuando visitó Londres en 1667:

> He sufrido una gran desilusión con el recibimiento que me ha tributado el Rey [escribió más adelante], pues, si bien me dieron a entender que el eficaz mecenazgo de que hace objeto a la famosa Royal Society es efecto, si no de buena voluntad, al menos de estima por esos estudios, he sabido que acostumbra a llamar a sus académicos *mes fous* (mis bufones).[13]

Con todo, aunque se riera de ellos, Carlos II hablaba con sus bufones en Whitehall, cosa que Luis XIV no hacía en Versalles.

En ambos países las nuevas fundaciones significaron nuevos co-

13. W. E. Knowles Middleton en *Notes and records of the Royal Society*, 32, 1977, p. 14. He modificado levemente la traducción del doctor Middleton.

mienzos. La Academia y la Royal Society no eran sencillamente la ratificación por el rey de algo que ya se estaba haciendo. En Inglaterra la Restauración puso fin al milenarismo y muchos proyectos beneficiosos se vinieron abajo. Algunos hombres como, por ejemplo, el poeta Milton y el naturalista John Ray (1627-1705), a la sazón tutor en el Trinity College de Cambridge, decidieron retirarse por prudencia o a impulsos de la conciencia; otros, como el pedagogo y químico John Webster o el matemático John Pell, encontraron bloqueadas sus oportunidades profesionales, mientras que para otros como Samuel Pepys y Henry Oldenburg la vida les ofrecía nuevas promesas. Ciertamente, algunos hombres de inquietudes y talentos correctos se vieron excluidos de la Royal Society porque no se les consideraba dignos de pertenecer a ella.[14] El ejemplo más destacado es el de Tomás Hobbes (1588-1679), uno de los más grandes filósofos ingleses, que había escrito una filosofía materialista un tanto parecida a la de Descartes y Digby y que se las daba de matemático. La persistente mancha de ateísmo le condenaba a los ojos de los conservadores, mientras que sus ataques reaccionarios contra Boyle y otros ofendían a los modernos. El elegido fue Ralph Cudworth, el filósofo platónico de Cambridge. Pero éste no llegó a ser miembro de la Royal Society; tal vez como provinciano no deseaba hacer el esfuerzo. Probablemente algunos otros provincianos fueron excluidos por la misma razón, pese a ser corresponsales regulares de la Society. Sin embargo, es difícil comprender por qué los londinenses Vincent Wing y Thomas Streete, los mejores autores de astronomía de Inglaterra, nunca fueron elegidos miembros; Streete tenía relaciones muy estrechas con miembros de la Society.

El número de miembros de la Royal Society era muy elevado en comparación con el de la Academia francesa: en 1690 la primera contaba con más miembros elegidos que la segunda en 1800. Por consiguiente cabe hacer preguntas sobre los ingleses interesados (en algún sentido) por la ciencia que no podrían hacerse sobre los franceses.[15] Casi la mitad (41 por ciento) de los primeros miembros pertenecían

14. Véase Webster (en nota 8) y Michael Hunter en *Notes and records of the Royal Society*, 31, 1976, pp. 9-114, el estudio más reciente de los primeros miembros. Con algunas excepciones, notablemente Petty, los colaboradores de Hartlib tenían poco que ver con la nueva Society, aunque Haak era tan activo como respetado.

15. Hay material disperso correspondiente a este particular en A. R. y M. B. Hall, *The correspondence of Henry Oldenburg*, University of Wisconsin Press, Madison y Londres, 1965 ss.

a la nobleza, a la burguesía rural o eran cortesanos; es de suponer que gran número de ellos ingresarían en la Society por motivos sociales o empujados por la ambición. Muchos no mostraron interés por las reuniones y se negaron a pagar sus subscripciones. Más o menos el mismo número (40 por ciento) pertenecía a alguna profesión liberal, correspondiendo la mayoría a los doctores en medicina (14 por ciento) o a los eruditos (10 por ciento); muchos —pero en modo alguno todos— de los trabajadores vigorosos de la Society procedían de estos estratos de la comunidad. El resto o bien eran mercaderes (6 por ciento) o extranjeros (bastante numerosos: 10 por ciento; la Royal Society no era, al principio, una sociedad nacional), o son indefinibles.

Como es obvio, en el siglo XVII la Royal Society no era un grupo profesional como hoy en día o como ya era entonces la Academia Francesa de las Ciencias. Ni de tan sólo uno de cada cincuenta miembros podía decirse que se ganara la vida con la ciencia en ningún momento de su vida; pero había otros, como Robert Boyle, Martin Lister o John Ray, que dedicaron gran parte de su vida a la ciencia sin ocupar cargo alguno ni percibir remuneración. Si prescindimos de la mitad de los miembros del siglo XVII, por inútiles e inactivos (muchos fueron expulsados más adelante), nos queda un nutrido grupo (más de doscientos) —muy superior a la población científica conocida de cualquier país— más por lo menos otros cincuenta individuos que no eran miembros pero mostraban un claro interés por la ciencia. ¿Qué les induciría a tomarse unas molestias tan poco provechosas? Porque sólo una persona muy ingenua podía suponer que el cultivo de la astronomía o la historia natural le permitiría hacer carrera, del tipo que fuese. Unos pocos, como Newton, se dedicaron por completo a estos estudios en la universidad; para otros, como Samuel Pepys, que estaba mucho más interesado por la historia náutica, representaba una ocupación para una mente activa y receptiva. Para otros, en cambio, la ciencia era una rama natural de su profesión de médico o apotecario, aunque si decimos esto, quedan muchos problemas por resolver. A otros parece que les atrajo la observación de los planetas y animales propia del campesino, Gilbert Whites del siglo XVII. Al parecer, a ninguno le inspiró mucho la utilidad del conocimiento que esperaban adquirir, o de las actividades que el mismo inspiraría. Otros, sin duda, tenían los ojos puestos en los resultados: ese era el legado de Hartlib, por ejemplo. Algo de

esto había en Boyle (que escribió un tratado primerizo titulado *Usefulness of experimental natural philosophy*) y todavía más en el ex colaborador de Hartlib, el prolijo párroco rural John Beale. Como en los casos de Beale y John Wallis, la laudable ambición de mejorar las obras de la naturaleza en beneficio de los hombres podía convertirse gradualmente en chauvinismo intelectual: el espíritu que animaba a Luis XIV y a Colbert manifestándose en ciudadanos particulares. Dicho esto, si preguntamos qué trabajos o qué individuos contemporáneos gozaban de mayor estima por parte de la Royal Society, encontraremos una respuesta muy vinculada a su remota prosperidad. La Royal Society publicó los *Principia* de Newton, el libro sobre los peces de Ray y Willughby y los estudios embriológicos de Malpighi. Con algunas dudas en el caso de la segunda, estas obras se cuentan entre las de aquella época que más valiosas consideran los historiadores. Newton, Ray, Malpighi, Boyle, Huygens, Cassini, Leeuwenhoek, James Gregory... todos estos nombres ilustres han conservado la reputación que ya tenían en sus tiempos. Desde luego, había algunos cuyo valor pasó casi desapercibido en aquel entonces, como el filósofo checo Marcus Marci (1595-1667) —anticipo del destino que aguardaba a un compatriota suyo más conocido, Gregor Mendel—, pero el historiador no puede basarse en estos cambios de reputación para argüir que el concepto de lo que debería ser el logro científico ha cambiado de modo fundamental desde finales del siglo XVII. Asimismo, no cabe argüir que porque Newton o Malpighi recibieron grandes elogios, todo el mundo trataba de alcanzar los mismos logros, pues no era así. Con mucha frecuencia los hombres acometían tareas o escribían informes que parecían tan inútiles, futiles o equivocados a sus contemporáneos como nos lo parecen a nosotros. Sería difícil encontrar algo de gran valor que no se publicase en las *Philosophical transactions* y fácil hallar muchos escritos de escasa calidad que fueron publicados en ellas. Por otra parte, el sentido general de aquella época, en lo que atañe a estas cosas, parece muy acorde con el nuestro. Aunque se malgastaron muchos esfuerzos y tentativas en tal o cual dirección, cuando se daba un gran paso hacia adelante era (hablando en términos generales) tan aparente entonces como lo es ahora.

La selección de los primeros académicos científicos en París estuvo a cargo de Cobert, guiado al principio por el matemático Pierre de Carcavi (muerto en 1684) y el hombre de letras Jean Chapelain

(1595-1674). Muchos aspectos de la historia interna de la institución antes de 1699, momento en que tuvo lugar una reconstrucción completa, resultan oscuros ahora. Antes de 1609 no existían reglas ni constitución. Christiaan Huygens fue traído de los Países Bajos para que fuera la luz científica más distiguida de la academia. Se excluyó cuidadosamente a los cartesianos sistemáticos y dentro de la academia tenían poca o ninguna importancia incluso algunos de los franceses a cuyo fervor debía su existencia la institución, como, por ejemplo, Auzout y Thévenot. Esto se debía en parte a que Colbert trajo de Bolonia a otro extranjero, Giovanni Domenico Cassini, que sería director del observatorio inaugurado en 1699. La corona reconoció el creciente talento francés, especialmente en las personas de los astrónomos Jean Picard (1620-1682) y Jean Richer (1630-1696) y el experimentador Edmé Mariotte (*c.* 1620-1684). Sin embargo, cuando se escriba la crónica general del movimiento científico francés fuera de París se verá claramente su escasa relación con la Academia, que no era ni representativa ni inclusiva.

Entre los académicos no había sólo pensionados, sino también funcionarios del estado, mientras que los miembros de la Royal Society eran libres de debatir lo que su capricho les dictara. A pesar de ello, sus actos se celebraban en orden, cosa que llenaba de admiración a extranjeros como Sorbière, que comentó (1663):

> No hay aquí nadie que ansíe hablar, que haga largas arengas o que se empeñe en decir todo lo que sabe: El que habla jamás es interrumpido, y las diferencias de opinión no ocasionan ningún resentimiento, no tanto como una forma de hablar ofensiva: no hay nada que me haya parecido más civil, respetuoso y mejor llevado que esta reunión.

En París no siempre había sido así. El lado débil de la Society (dejando aparte la falta de dinero, aparatos y laboratorios) era la inestabilidad de la asistencia a las reuniones y la consiguiente incapacidad para seguir algún tema o plan. Con frecuencia vemos cómo un experimento que debe hacerse o un libro que hay que criticar cae en el olvido; sólo raramente se debatía el mismo asunto en dos o más reuniones consecutivas. Se intentó crear una estructura de comités, para que grupos de individuos se ocuparan de temas como la agricultura, la mecánica, el comercio, la botánica, etcétera, pero el intento no tardó en desintegrarse.

En 1662 se nombró un director de experimentos, Robert Hooke (1635-1703), para que supervisara la ejecución de los ideados por él mismo o por otros o bien ordenados por la asamblea: Hooke era fértil, ingenioso y asiduo; produjo una fantástica variedad de material, pero no puede decirse que en su calidad de «director de investigación» diera muestras de congruencia o persistencia. Era hombre de ideas brillantes, pero incapaz de concentrar sus esfuerzos. La Society siguió navegando a la deriva, raramente sin que se celebrase alguna reunión interesante, pero sin sacar conclusiones ni iniciar una línea de investigación. De vez en cuando se intentaba que los actos fueran más metódicos, por ejemplo, requiriendo que los miembros se turnasen para aportar un «discurso», pero el reglamento nunca llegó a surtir un efecto permanente. La Royal Society se convirtió en lo que todavía es: un lugar donde informar en vez de un instituto de investigación. La nota prolija la hizo sonar claramente Wallis en la narración que efectuó de las primeras reuniones del Gresham College:

> Nuestra misión era (excluyendo las cuestiones de teología y los asuntos de estado) tratar y estudiar Investigaciones Filosóficas y las cuestiones relacionadas con ellas; como la Física, la Anatomía, la Geometría, la Astronomía, la Navegación, la Estática, la Magnética, la Química, la Mecánica y los Experimentos Naturales; con el estado de estos estudios, tal como entonces se cultivaban en el país y en el extranjero. Después tratábamos de la circulación de la sangre, las válvulas de las venas, las *venae lactae*, los vasos linfáticos, la hipótesis copernicana, la naturaleza de los cometas y de las nuevas estrellas, los satélites de Júpiter, la forma (como a la sazón aparecía) de Saturno, las manchas del Sol y su rotación sobre su propio eje, las desigualdades y la selenografía de la Luna, las diversas fases de Venus y Mercurio, el perfeccionamiento de los telescopios y el esmerilado de vidrios para tal propósito, el peso del aire, la posibilidad o imposibilidad de los vacíos y su aborrecimiento por la naturaleza, el experimento torricelliano con azogue, el descenso de cuerpos pesados y los grados de aceleración en ello; y diversas otras cosas de naturaleza parecida. Algunas de las cuales no eran entonces más que nuevos descubrimientos ...[16]

16. Sir Henry Lyons, *The Royal Society*, Cambridge U. P., Cambridge, 1944, pp. 8-9.

No había allí ningún programa, nada que estorbase la espontaneidad de mentes despiertas que ansiaban examinar las ideas y los descubrimientos más recientes; y así continuó; podríamos hacer una lista de temas semejante, aunque más larga, que representara las inquietudes de la Royal Society durante los treinta años que siguieron a la obtención de su carta constitucional.

En París ocurría algo parecido. Cada Año Nuevo los académicos parisinos decidían llevar a cabo ciertos proyectos, pero, de hecho, sus reuniones eran bastante prolijas. Tenían unos cuantos objetivos generales como, por ejemplo, resolver el problema de determinar la longitud en el mar, efectuar la cartografía de Francia, la hidráulica y la mecánica prácticas, pero, en realidad, abordaban a discreción otros temas que despertaban su interés, tales como la bomba de aire, el telescopio reflector o la teoría de la luz. A pesar de todo, a la Academia se le plantearon algunos problemas concretos, incluyendo el diseño óptimo de las cureñas. Sin embargo, en dos aspectos la Academia era muy distinta de la Royal Society. En primer lugar, la construcción del Observatoire de París (1669) proporcionó una base permanente para los astrónomos y la posibilidad de un programa de trabajo continuo; Cassini era muy sistemático y se embarcó (junto con sus ayudantes) en largos proyectos tales como la codificación de los movimientos de la Luna y de los satélites de Júpiter, a la vez que Picard emprendía la medición de un grado del meridiano cerca de París. En el mar se hicieron extensas pruebas con los cronómetros marítimos de Huygens, en parte bajo la supervisión de los astrónomos, mientras que los viajes de Jean Richer al Canadá francés (1670) y a Cayenne (1672) permitieron descubrir por primera vez la longitud exacta del litoral oriental de América. En Cayenne Richer observó la posición de Marte en el perigeo simultáneamente con sus colegas en París; a partir de las mediciones así obtenidas, se calculó la distancia del Sol, casi correctamente, por primera vez. Asimismo, Richer consideró necesario acortar el péndulo de su reloj astronómico, en comparación con París: este hecho resultaría una confirmación importante de la teoría newtoniana de la gravitación. En segundo lugar, los parisinos decretaron la obligación de certificar el mérito de los nuevos inventos y procesos técnicos, empezando por los proyectos encaminados a averiguar la longitud de un buque en el mar o a quitar la sal del agua de mar, y siguiendo especialmente por la consideración de las nuevas máquinas que se proponían. La obligación quedó regis-

trada en el nuevo reglamento de 1699: la colección de modelos depositados por los inventores formó el origen del museo del Conservatoire des Arts et Métiers de París. De manera parecida, la Academia también controlaba las publicaciones de sus miembros, mucho más que la Royal Society, aunque ésta dio a conocer deliberadamente que aprobaba ciertos libros, entre ellos los *Principia* de Newton.

En algunos de estos aspectos, quizá principalmente en la organización de expediciones científicas y de trabajos astronómicos en equipo, la Academia se acercaba más que la Royal Society al ideal baconiano. En sus cartas desde Londres Henry Oldenburg instaba constantemente a los filósofos de la naturaleza de todos los países a coordinar su labor para formar un gran almacén de conocimientos naturales que pudiera servir para formular una verdadera filosofía de la naturaleza. También Huygens escribió en 1666 que la principal y más útil ocupación de la nueva Academia debía ser «trabajar en la historia natural un poco a la manera sugerida por Verulam [Bacon]». Los franceses eran tan conscientes como lo había sido Bacon de la importancia del esfuerzo cooperativo y de contar con abundantes medios de investigación y preferían publicar anónimamente los resultados de sus empresas oficiales como la *Mesure de la terre* (de Picard, 1671) o las *Mémoires pour servir à l'Histoire Naturelle des Animaux* (también en 1671). Estaban tan seguros como Bacon de que la recogida de datos debía preceder a la teoría, por lo que Fontenelle pudo escribir sobre la reforma de 1699 con el auténtico tonillo baconiano: «La Física Sistemática debe abstenerse de construir su edificio hasta que la Física Experimental pueda proporcionarle los materiales necesarios». Los académicos vieron que podían ponerse de acuerdo sobre la «observación indigerida de algún fenómeno» cuando era imposible el acuerdo sobre la causa y la teoría. La Royal Society, más conscientemente baconiana en sus «historias» (narraciones) de oficios, algunas de las cuales se publicaron en la *History* de Sprat y en las *Philosophical transactions*, nunca alcanzó el mismo nivel de trabajo de equipo en la investigación, ya que sus colaboraciones fueron más bien fruto de la laboriosidad con que Oldenburg dirigía la correspondencia de la Society, por ejemplo, en forma de respuestas a las preguntas sobre historia natural recibidas de diversas partes del mundo.[17] La Society

17. Véase Hahn (en nota 12), cap. 1, y Marie Boas Hall en Harry Woolf, ed., *The analytic spirit*, Cornell University Press, Ithaca y Londres, 1981, pp. 177-194.

nunca llegó a parecerse, siquiera remotamente, a un instituto de investigación, aunque sí se esforzó por dictaminar como autoridad colectiva la validez de los experimentos, como ocurrió cuando en 1671-1672 recibió noticias del telescopio reflector y de las primeras investigaciones ópticas de Newton, y, de hecho, comúnmente, de acuerdo con el precepto baconiano «Que se pruebe el experimento». Contando sólo con Hooke (director de experimentos) y Oldenburg (secretario) como funcionarios en parte asalariados, careciendo del sitio y los medios necesarios para la investigación activa, era casi imposible llevar a cabo un programa continuo de investigación, a no ser que lo realizase el entusiasmo de un individuo.

Así, por ejemplo, todos los telescopios astronómicos y los relojes de observatorio que había en Inglaterra eran de propiedad privada. Cuando Carlos II decidió emular a su primo de Francia fundando un observatorio nacional, literalmente proporcionó un edificio (proyectado por Wren) y nada más. Cuando John Flamsteed empezó su carrera como Astrónomo Real en 1675 tuvo que aportar sus propios instrumentos, junto con los que donaron sus amigos, en especial Jonas Moore (cuyos relojes se conservan todavía). Él mismo se vio obligado a aceptar un beneficio eclesiástico rural para subsistir y nunca pudo costearse la ayuda necesaria. Su labor principal —la determinación de las posiciones de las estrellas— no estuvo a disposición del público interesado hasta después de más de treinta años, pero proporcionó las observaciones de la Luna que utilizó Newton en su teoría de la gravitación. Es evidente que sólo a Flamsteed le corresponde el mérito de haber reducido los errores de la medición astronómica a pesar de todos los obstáculos que tuvo que vencer. La Royal Society tenía otros observadores notables, tales como Robert Hooke y Edmond Halley (sucesor de Flamsteed en Greenwich), pero éstos tuvieron que hacer lo que pudieron con sus propios recursos, como les ocurrió a observadores ajenos a la Society: por ejemplo, Thomas Streete. La Royal Society no intervenía en la dirección del observatorio de Greenwich ni utilizaba los instrumentos del mismo, aunque de vez en cuando algunos de sus miembros visitaban a Flamsteed a título particular. A resultas de todo ello, aunque en Inglaterra continuó la buena labor particular en el campo de la astronomía, a cargo de Flamsteed antes de irse a Greenwich, o de Robert Hooke, que observó la gran mancha roja de Júpiter y determinó su período de rotación al mismo tiempo que Cassini lo hacía en París, no había

duda de que el observatorio parisiense era el centro europeo de la excelencia en su campo. Lo mismo podría decirse de la investigación anatómica comparada, por motivos parecidos, a pesar de los loables esfuerzos de individuos de la Society como Nehemiah Grew (1641-1712) y Edward Tyson (1650-1708), primer anatomista de un primate.

En toda Europa la formación de sociedades científicas muestra una tendencia dual: por un lado, a cristalizar una organización específicamente científica partiendo de grupos no oficiales con inquietudes intelectuales más generales y superficiales y, por el otro, a la preponderancia de los experimentalistas dentro de la organización. En Italia, Francia e Inglaterra hubo una transición del análisis de sistemas o hipótesis natural-filosóficos a la verificación y acumulación de datos; a medida que la revolución científica fue dando mayor importancia a los hechos que a las palabras, al laboratorio que al estudio, y a medida que la preparación de comentarios y críticas de textos antiguos cedió su lugar a la redacción de memorias que describían los resultados de la investigación sistemática, las características de la organización científica cambiaron de acuerdo con todo ello. En la primera mitad del siglo XVII la función de una asamblea científica había sido promover el estudio y la difusión de la nueva idea de la ciencia y proporcionar un foro en el cual el pensamiento original de un Galileo o un Descartes pudiera contrastarse con las opiniones tradicionales de la ciencia, no ante un público formado exclusivamente por entusiastas, sino ante una sección representativa, lo más amplia posible, de la sociedad culta e instruida. Mecenas como los hermanos Médicis, o recolectores de noticias como Mersenne, juntaron el peso acumulativo de la innovación para atacar a la ciencia de las universidades y los libros de texto. En un ambiente intelectual cuyas tradiciones dogmáticas empezaban a desintegrarse, defendieron la «nueva filosofía» ante una nueva clase culta que se había liberado de la disciplina severa del antiguo erudito profesional y estaba dispuesta a admirar la acuidad de ingenio, la sutileza de razonamiento y la fertilidad de imaginación con preferencia a la lealtad a «sólidos» puntos de vista ortodoxos. Si la «nueva filosofía» encontraba obstáculos en la universidad, podía apelar, a través de la asamblea científica, a los más tolerantes, vehementes y acaudalados círculos intelectuales de la corte y la capital. Pero la alianza de la ciencia moderna en sus primeras etapas con toda la corriente turbulenta del desarrollo cultural en

el siglo XVII fue inevitablemente incompleta y de corta duración. La labor científica creativa e importante no tardó en dejar atrás al diletante y al virtuoso: raras veces, por ejemplo, aparece el nombre de John Evelyn en las actas de la Royal Society que Birch publicó en su *History*. Un hombre de cultura general no acertaba a ver la utilidad de las labores científicas detalladas, pues, si bien era capaz de disfrutar en un debate sobre el concepto cartesiano del animal como máquina, tendía a encontrar simplemente cómico el hecho de que el naturalista removiera la tierra en busca de huevos de insecto. El aprovechamiento del cambio de las perspectivas intelectuales, tan fascinante en sus rasgos generales, inevitablemente se transformaba en tedio y pedantería a los ojos de los que andaban en busca de entretenimiento y de novedades sorprendentes. A consecuencia de ello, la Academia Montmor se disolvió y la Royal Society dejó de ser interesante para todos a partir de los quince años de su fundación.

Durante más o menos los últimos veinticinco años del siglo XVII, período al que podría calificarse de «época del consenso cartesiano» —durante la cual el fenómeno de carácter general más interesante fue el neocartesianismo experimental y matemático representado por Huygens, Leibniz y Malebranche—, no hubo ningún hondo problema de principios que dividiera a los intelectuales, como, por ejemplo, la cuestión copernicana los había dividido antes y la filosofía newtoniana lo haría después. Por consiguiente, en la segunda mitad del siglo XVII el cometido de la sociedad científica cambió de modo considerable. Convertida ya en una institución enteramente profesional, sirvió como foco para debatir obras más que ideas. Su objetivo era cultivar las ciencias más que promover una «nueva filosofía». La oposición de los maestros universitarios aristotélicos o de la clase médica ya no representaba un obstáculo serio. Más que aprobación, lo que necesitaba el movimiento científico eran medios: edificios, aparatos, dinero para el mantenimiento de la investigación y métodos para intercambiar sus resultados. Se comprobó, por ejemplo, que a medida que los libros científicos se hacían más auténticamente técnicos, más plenamente dedicados a la descripción de investigaciones (en lugar de ser útiles libros de texto o manuales prácticos), las editoriales los rechazaban a menos que se depositaran grandes sumas de dinero. O que, si bien existía un mercado comercial en expansión para los relojes normales, los instrumentos de navegación e incluso los telescopios y los microscopios, sólo el estímulo económico era capaz de

inducir a los artesanos a arriesgar sus beneficios dedicándose a perfeccionar instrumentos para el progreso de la ciencia. En resumen, la tarea de una sociedad científica consistía menos en afianzar la revolución científica que en mantener su *momentum* y cosechar los resultados. Sin duda ya era obvio que, por mucho que la sociedad científica ayudase y alentase al científico, las verdaderas innovaciones —en ideas o métodos— tenían que salir de individuos. El gran ascendiente de Boyle, Helmont o Malpighi lo demuestra; Newton lo subrayaría con fuerza. La Royal Society se volvió rápidamente individualista. La reforma de la Academia Francesa de las Ciencias en 1699 reconoció oficialmente la limitación de los trabajos emprendidos en común y ordenó que cada académico eligiera un tema de estudio concreto de tal modo que los informes que sobre él hiciera iluminaran a toda la agrupación.[18] Del concepto de instituto de investigación apenas volvería a hablarse hasta la Revolución Francesa.

Mientras tanto, Alemania retrasaba un poco su aparición en escena. Por no citar a Kepler, que no tuvo ningún sucesor meritorio en la Europa central, ni a numerosos e influyentes químicos como Johann Rudolph Glauber (1604-1670), Alemania contribuyó al desarrollo de la ciencia experimental con personas como el alcalde intelectual de Magdeburg, Otto von Guericke (1602-1686), Caspar Schott (1608-1666) e incluso el muy prolífico Athanasius Kircher (1602-1680). La división territorial de Alemania, el atraso de sus condiciones sociales y económicas y la guerra de los Treinta Años redujeron la eficacia de sus escuelas y universidades, que eran numerosas y excelentes. La primera sociedad que se fundó en Alemania fue la Academia de los Investigadores de la Naturaleza (*Academia Naturae Curiosorum*), cuya descendiente existe todavía; oficialmente, la academia nació en 1652, pero en realidad empezó a desarrollarse a partir de 1661 gracias a los esfuerzos de un extraño individuo, Philipp Jacob Sachs von Lewenheimb (1627-1672) médico de Breslau (Wroclaw). Se trataba de una sociedad de médicos cuya única función verdadera consistía en publicar las colaboraciones de sus miembros en un volumen anual, la *Miscellanea curiosa*; los artículos eran más que nada descripciones de experiencias curiosas vividas en el ejercicio de la medicina o curiosidades naturales, pero había también reseñas de libros y algunos trabajos de alcance más amplio. Si esta empresa «difícilmente merece

18. Hahn, *op. cit.*, p. 30.

que se la clasifique como sociedad culta» —aunque *Miscellanea curiosa* gozó de cierta reputación (baconiana) en su época y la academia fue adoptada por el emperador en 1677—, entonces el otro grupo alemán de siglo XVII, el *Collegium Curiosum sive Experimentale* de Altdorf, cuyo modelo era la Accademia del Cimento, no era otra cosa que el club privado que ya existía en Italia mucho antes.[19] A pesar de todo, llevó a cabo una serie de experimentos físicos típicos de la época y publicó la correspondiente descripción de los mismos.

En Alemania la creación de una academia nacional al estilo de la francesa fue obra de un solo hombre, el filósofo y matemático Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). Durante muchos años Leibniz había servido al pequeño estado de Hannover, pero hacia finales de siglo encontró un mecenas para su viejo proyecto en el elector (más tarde rey) de Brandenburgo-Prusia, Federico I. La Academia de Berlín fue creada en 1700. La ciudad estaba muy alejada de los principales centros del saber de Alemania —su universidad no fue fundada hasta transcurrido más de un siglo— y ciertamente no existía en ella ningún grupo de aficionados, virtuosos o curiosos científicos capaz de darle a la academia una existencia espontánea; la institución berlinesa debería gran parte de su vigor al talento importado (algunos miembros, como el propio Leibniz eran alemanes de otros estados). Leibniz deseaba desde hacía mucho tiempo promover los intereses de su nación y elevar sus niveles tecnológicos fomentando la lengua vernácula —hasta entonces y durante mucho tiempo después, el latín o el francés eran las lenguas cultas y finas de Alemania— y la reforma de la educación hacia asignaturas prácticas. A juicio de Leibniz, para alcanzar tales fines lo primero que se necesitaba era una academia nacional que se ocupara de las aplicaciones prácticas así como de las ciencias puras. Mientras que anteriores exponentes de la utilidad del descubrimiento científico aspiraban más bien a variar todo el equilibrio entre el hombre y la naturaleza para el bien universal, y mejorar así la condición de toda la humanidad, Leibniz, en sus argumentos favorables a la nueva academia, tenía los ojos puestos en un objetivo que Bacon había considerado menos noble: la exaltación de una nación en comparación con las otras.

Al modo de ver de Leibniz, en otro tiempo Alemania había goza-

19. Martha Ornstein, *The role of scientific societies in the 17th century*, University of Chicago Press, Chicago, 1913 [1938], p. 175.

do de preeminencia en las artes útiles, especialmente la minería y la química, pero también en la relojería, la ingeniería hidráulica, la orfebrería, la tornería, la forjadura, etcétera. La astronomía la restauraron los alemanes, mientras que los «Nieder-Deutschen» (holandeses) habían inventado el telescopio y dominado la navegación. La única forma de remediar el deterioro subsiguiente consistía en el generoso fomento de la ciencia, que Leibniz combinaba con la imposición de una política económica estrictamente mercantilista que permitiría que el estado llegara a ser autosuficiente. Como dijo en una carta al príncipe Eugenio, comentando la academia científica que se proponía para Viena:

> Con el fin de perfeccionar las artes [prácticas], las manufacturas, la agricultura, las dos clases de arquitectura [civil y militar], la descripción topográfica de los países, y la minería, y también para proporcionar trabajo a los pobres, dar aliento a los inventores y empresarios, y finalmente para todo lo que tenga que ver con la economía o la mecánica del estado civil y militar, se requieren observatorios, laboratorios, jardines de hierbas, colecciones de fieras, vitrinas de rarezas naturales y facticias, y una historia físico-médica para cada año basada en los informes y las observaciones que los médicos asalariados estarían en la obligación de facilitar.[20]

Aunque se perciba cierta ingenuidad en su elección de medios y funciones, Leibniz, historiador, matemático, filósofo, diplomático y consejero confidencial de príncipes, en su doble devoción a la ciencia y a Alemania veía la academia científica como instrumento necesario del estado moderno, un instrumento que permitiría a la ciencia interpretar su papel en la política social y económica. Leibniz tenía poca paciencia con aquellos que «consideran las ciencias no como algo muy importante para el bienestar humano, sino como una diversión o un juego» y criticaba a la Academia Francesa de las Ciencias por esta razón.[21] La ciencia como factor de la creación del prestigio nacional, su papel en la guerra y en la rivalidad comercial entre los estados, era apreciada en Inglaterra y Francia además de en Alemania; pero nadie que pudiera alardear de un alto rango como filósofo y científico

20. Foucher de Careil, *Oeuvres de Leibnitz*, París, 1859-1875, VII, p. 317.
21. A Tschirnhaus, enero de 1694 (C. I. Gerhardt, *Math. Schriften*, en *Ges. Werke* hrsg. von G. H. Pertz, IV, p. 519).

anunció más claramente que Leibniz la importancia de la organización científica a los recelosos estadistas.

Vemos, pues, que se buscó la mitigación de los obstáculos al progreso científico convirtiendo la apelación de Bacon a los intereses de la humanidad en una apelación a los intereses del estado, dirigido a un monarca o a un gran ministro. Un enfoque totalmente distinto, en sociedades muy distintas de la prusiana, consistía en hacer todo lo posible por despertar el entusiasmo y el apoyo del público por medio de una apelación directa, utilizando una técnica relativamente nueva como era la publicación semanal o mensual. Quizá sea natural el hecho de que donde más éxito tuvo esta técnica fuera en Inglaterra, la sociedad más abierta, en asociación con la Royal Society. Es cierto que los franceses fueron los primeros en este campo con el *Journal des Sçavans* (enero de 1665), pero esta publicación nunca fue una revista específicamente científica, puesto que se ocupaba de todos los campos del conocimiento. Su principal y útil propósito consistía en resumir los nuevos libros. Daba cuenta con bastante regularidad de las actas de la Academia de Ciencias y publicaba algunos trabajos presentados por los académicos, así como extractos de las *Philosophical Transactions*, de Henry Oldenburg, editadas en Londres. Bajo la dirección de su fundador, Denis de Sallo, el *Journal des Sçavans* apareció sólo durante tres meses sin el beneficio de una real licencia:

> Eruditas sin pedantería ni jerigonza, ingeniosas de vez en cuando, incluso levemente maliciosas cuando la ocasión lo justificaba, alusivas y derivadas del saber y la ciencia del día, las reseñas que llenan las páginas de estos [13] folletos semanales todavía son dignas de leerse cuando uno trata de captar el temperamento y el clima de la época.[22]

De Sallo era un hombre libre de fanatismo, lo cual le llevó a herir la sensibilidad del clero; desde marzo de 1665 hasta principios de 1666 el *Journal des Sçavans* estuvo prohibido; reapareció, mucho más aburrido, bajo la dirección del *abbé* Jean Gallois.

Al morir el *Journal des Sçavans* original, nacían las *Philosophical Transactions*, inspiradas sin duda por el ejemplo francés, ya que desde hacía un tiempo Oldenburg pensaba en la posibilidad de mandar una

22. Harcourt Brown, *Science and the human comedy*, University of Toronto Press, Toronto, 1976, p. 83.

hoja informativa científica a los colaboradores, basándose en su voluminosa correspondencia, en los libros que recibía del extranjero y en las actas de la Royal Society. En su lugar adoptó el modelo francés de una publicación mensual cuya finalidad era tener a los «virtuosos» y «curiosos» informados de lo que ocurría en Londres y en otros centros principales, pero limitada a los temas matemáticos y científicos. La revista se editaría para el bien público, pero Oldenburg, su propietario y director, la veía también como un medio de obtener beneficios extras y muy necesarios de sus trabajos por cuenta de la Royal Society: las *Philosophical Transactions* no pasarían a ser el órgano oficial de la institución hasta casi cien años después, ni tampoco se quería publicar exclusivamente en ellas las actas de la Society. Desde el primer número (marzo de 1665) Oldenburg publicó dichas actas, pero también incluía abundantes extractos de las cartas de corresponsales del país y del extranjero, traduciéndolas si hacía falta. Oldenburg permitía a sus corresponsales decir lo que quisieran, aunque, como han hecho numerosos directores de revistas desde entonces, no podía resistir la tentación de mejorar el estilo y la gramática. También tomaba en préstamo cosas del *Journal des Sçavans*. La mayoría de las reseñas de libros las preparaba él mismo, con no poca diligencia y pericia, reproduciendo a veces el criterio de corresponsales regulares como John Wallis, criterio que él había pedido por carta. Obviamente, la tarea de Oldenburg habría sido imposible, en principio, o cuando menos mucho más difícil, de no haber podido contar con los consejos regulares y publicables de ayudantes tan puntuales y serios como Wallis, John Beale, Robert Boyle y especialmente John Collins. Oldenburg, que quizá poseía una comprensión muy superficial de las matemáticas, ciertamente no estaba muy versado en dicha disciplina y a este respecto Collins era su mentor, tanto en lo que se refiere a libros como al contenido de cartas. Collins proporcionaba la mayor parte del material para contestar a las cartas sobre matemáticas que Oldenburg recibía en Londres. Hooke colaboró estrechamente con Oldenburg durante gran parte de los años en que ambos fueron funcionarios de la Royal Society, pero sin brindarle el mismo apoyo: está claro que Hooke no ansiaba facilitar material para las *Philosophical Transactions* —prefiriendo publicarlo él mismo a su debido tiempo, lo cual era muy razonable—, ni se mostraba en general muy cooperativo en lo que hace a entregar las respuestas a las

preguntas o los comentarios sobre libros. Y hay que decir que tendía a juzgar con severidad las obras de los demás.

Porque su publicación era regular (a diferencia de la del *Journal des Sçavans*), porque su nivel de interés era siempre alto y porque la variedad de su contenido las hacía atractivas para todos los gustos, las *Philosophical Transactions* no tardaron en adquirir prestigio y en ser muy buscadas en el extranjero. Los primeros volúmenes se tradujeron al latín y reeditaron en Amsterdam; la Academia de Ciencias de París hizo traducir algunos al francés para su uso particular. Oldenburg creó la revista y el periódico científicos como medios de comunicación. Tenía que llenar unas páginas, que satisfacer a unos lectores, por lo que echaba mano de cuanto podía resultar más idóneo para la publicación, sorprendiendo a veces al autor de una carta que no esperaba ver su nombre en letra de imprenta. El sistema resultó ideal para dar testimonio y comunicar informaciones o ideas cuya expresión no exigía un alcance mayor. Un ejemplo célebre es la carta de Newton acerca de la marcha de sus investigaciones relativas a la luz y el color, que ocupaba trece páginas del número 80 de la publicación, el cual salió el 19 de febrero de 1672. Inmediatamente despertó interés en otras partes y es posible (aunque ello es discutible, por supuesto) que adelantase en muchos años el conocimiento por parte del público de la labor que realizaba Newton.[23] El propio Newton había estudiado las *Transactions* y es casi seguro que redactó su carta a sabiendas de que se la publicarían, aunque su correspondencia con Oldenburg no había comenzado hasta principios de aquel año. A petición de Newton, Oldenburg hizo algunos cambios en la versión publicada de la carta, lo cual no era en modo alguno desacostumbrado y es otro rasgo de la práctica periodística.[24]

Tanto extranjeros esperanzados como colegas de la misma Inglaterra empezaron a escribir a Oldenburg con la intención concreta de ver sus cartas publicadas en las *Transactions*. El más prolijo y distinguido de los extranjeros fue el microscopista holandés Antoni van

23. Además de la carta de Newton, el número 80 contenía ocho páginas que reseñaban tres libros y el índice anual, que era otra innovación. Para comprimirlo todo en veinticuatro páginas el impresor se vio obligado a usar un tipo muy pequeño (aunque legible) para la última página de reseñas.

24. Véase A. R. y M. B. Hall, *The correspondence of Henry Oldenburg*, University of Wisconsin Press, Madison y Londres, 1965 ss., once volúmenes publicados. Véase también Marie Boas Hall en *British Journal for History of Science*, 2 (1965), pp. 177-190.

Leeuwenhoek (1632-1723), que no conocía otra lengua que la propia; por suerte Oldenburg, que hablaba dicha lengua y algunas más, podía traducir sus cartas para publicarlas en inglés o en latín. El ejemplo afortunado de Londres y París pronto fue imitado en otras partes: en Roma por los *Giornale dei Letterati* (que tomaba mucho en préstamo de sus dos predecesoras y de vez en cuando se ponía directamente en contacto con Oldenburg); en Leipzig, mucho más tarde, por las *Acta Eruditorum* (1682), de las cuales Leibniz era cofundador. Las *Acta* se parecían al *Journal des Sçavans* por su amplia gama de temas y por publicar reseñas de libros, a la vez que, como las *Transactions*, publicaba artículos, de los cuales los de matemáticas eran de primera importancia pues procedían de la escuela matemática del propio Leibniz. También podríamos citar *Nouvelles de la République des Lettres* (1684), de Pierre Bayle, como una de las revistas más influyentes de todos los tiempos, y las *Mémoires de Trévoux* (1706), como ejemplo de publicación conservadora, pues la producían los jesuitas y durante mucho tiempo encabezó la oposición al newtonianismo en Francia.

Aunque la revista fue de vital importancia para la conservación de la buena salud del movimiento científico a partir del siglo XVII, el libro siguió siendo el vehículo que brindaba mayor repercusión a los trabajos nuevos, desde los *Principia* (1687) y la *Opticks* (1704), de Newton, pasando por *Traité elementaire de chimie* (1789), de Lavoisier, hasta *El origen de las especies* (1859), de Charles Darwin, e incluso más allá. La situación existente en el pasado difería de la actual en muchos sentidos, el menor de los cuales no era el hecho de que los lectores inteligentes de revistas fueran tan pocos en número y se necesitase el efecto del libro, que era más masivo, para llevar a término cambios en las ideas recibidas. Cabría decir que una distinción entre las ganancias tácticas (los artículos) y los avances estratégicos (los libros) ya no era evidente y, de hecho, no era universalmente cierta ni siquiera a finales del siglo XVIII. Además, el libro que reflejaba el más reciente movimientos de ideas servía también como libro de texto, cual fue el caso de selecciones de los *Principia* durante más de un siglo. No es que hubiera una falta absoluta de textos científicos cuyo único propósito fuera satisfacer las necesidades de los principiantes: se trataba más bien de que éstos tendían a ser relativamente pocos y muy conservadores. La tremenda importancia

de la revista científica en los tiempos modernos ha surtido el efecto consiguiente en el carácter y la calidad de los textos explicativos.

La libre transferencia de material de una publicación a otra cuando ya existían tres o cuatro de ellas durante la última parte del siglo XVII es una prueba fehaciente de la comunidad del espíritu científico, sobre todo en aquel cuarto de siglo (más o menos) en que, como ya hemos dicho, dominó una filosofía de la naturaleza cuyos rasgos generales eran neocartesianos. Si el historiador utiliza su microscopio para estudiar los contactos y pensamientos cotidianos de los filósofos de la naturaleza en Italia, Inglaterra, Francia y Alemania, encontrará, antes del decenio de 1690, pocos indicios de estilo o prejuicio nacional, menos en matemáticas. Un inglés podía haber hecho naturalmente lo que hizo Malpighi; a decir verdad, la microscopia botánica de Nehemiah Grew iba en dirección a la de Malpighi; Huygens se sentía aún más cómodo en Londres que entre los académicos de París. Los astrónomos, al igual que los matemáticos, colaboraban unos con otros a escala completamente internacional. Todo esto representaba un cambio en verdad extraordinario desde principios de siglo, y la ascensión del newtonianismo introduciría a su vez nuevos rasgos. La comunidad intelectual de Europa en las postrimerías del siglo XVII era quizá mayor que en cualquier otro momento desde el siglo XIV. La publicación de las obras de un matemático escocés (James Gregory) en Padua, la de las obras de microscopistas italianos y holandeses en Londres o la de un matemático y físico holandés en París; la carrera de Cassini y Leibniz (durante un tiempo) en París, de Oldenburg y Nicolás Mercator en Londres, la correspondencia científica entre países incluso en tiempos de guerra, todo esto demuestra que las afirmaciones de Bacon sobre la cooperación entre individualistas y sociedades por encima de las fronteras nacionales no era simple retórica, y que, a pesar de las diferencias de organización y objetivo, todas las academias científicas avanzaban hacia un objetivo común.

Tal vez convendría agregar unas cuantas palabras sobre las relaciones institucionales de la ciencia y la medicina, al menos en lo que se refiere a Inglaterra y Francia, tanto porque las organizaciones en los diversos niveles de la clase médica eran mucho más antiguas que en cualquier otra ciencia, como porque los médicos formaban el grupo profesional más nutrido de cuantos desplegaban actividad científica en el siglo XVII. Sin embargo, el deseo individual de un Harvey

o un Malpighi de hacer nuevos descubrimientos en anatomía y fisiología, o de Martin Lister (1638?-1712) de estudiar los fósiles, destaca sobre el conservadurismo general de las instituciones médicas, que existían sobre todo para proteger los intereses de sus miembros.

En Inglaterra la Barbers' Company (Compañía de Barberos) se fundó en 1412 y en 1540 se unió a los Cirujanos al amparo de una nueva carta constitucional. Mientras tanto, Enrique VIII ya había otorgado la correspondiente carta al Colegio de Médicos fundado por Thomas Linacre en 1518. El «Arte y Misterio de los Apotecarios» recibió la suya en 1617. En estas cuestiones, al igual que en otras, Inglaterra no estaba al día, ya que en el continente los barberos-cirujanos y los apotecarios de algunos lugares estaban organizados en gremios desde el siglo XIII. El objeto de la compañía o colegio profesional era restringir la entrada en la profesión a quienes se hubieran preparado adecuadamente por medio del aprendizaje u otro sistema en una región dada, impedir el ejercicio de la profesión por intrusos procedentes de otra parte y sin el permiso correspondiente y castigar a quienes la ejercieran sin título. En lo que se refiere a los médicos en concreto, lo normal en el continente era que en las ciudades universitarias el ejercicio de la medicina en la ciudad y la región estuviera reglamentado por la Facultad de Medicina de la Universidad; en las ciudades no universitarias como Nîmes (1397) y Burdeos (1411) se fundaron colegios que con frecuencia sólo admitían como miembros a quienes se hubiesen graduado en determinadas universidades.

> Está suficientemente claro, escribe sir George Clarg, que Londres era excepcional (podría ser temerario decir que único) entre las grandes ciudades europeas por cuanto no tenía ninguna organización médica (antes de 1518), y que en algunos de los sitios conocidos por los hombres de negocios ingleses había una especie de organización apropiada para las ciudades que, al igual que Londres, no tenían universidad.[25]

Todas estas asociaciones, al igual que los gremios de artesanos y comerciantes, eran esencialmente monopolísticas. Conferían privilegios a sus miembros y tenían poderes para protegerles. Incluso a principios del siglo XVI la atmósfera creada por la Facultad de Medicina

25. Sir George Clark, *History of the Royal College of Physicians*, Oxford U. P., Oxford, 1964, I, p. 65.

de la Universidad de París era tan sofocante que François Rabelais prefirió trasladarse a la ciudad meridional de Montpellier, donde había una gran universidad médica. Un siglo más tarde la facultad parisina era la que más se oponía a la medicina paracelsiana en toda Europa, en un momento en que el galenismo puro del Colegio de Médicos de Londres, inculcado por Linacre y fomentado por Caius, ya se estaba debilitando, como atestigua la *London Pharmacopoeia* (1618) y la admisión de disidentes tales como Teodoro Turquet de Mayerne y Robert Fludd. El primero había tenido que irse de París en 1611, obligado por la Facultad, que le acusaba de renegado y paracelsista, después del asesinato de Enrique IV; en Inglaterra llegó a ser médico de Jacobo I. Fludd (1574-1637) nunca fue nada salvo un hombre de filosofía extravagante, un rosacruz; ingresó en el colegio tras vencer ciertas dificultades, pero fue elegido Censor del mismo cuatro veces. La guerra entre los médicos químicos o seguidores de Paracelso y los galenistas tenía por escenario toda Europa; Harvey no destacó menos como blanco de insultos, aunque durante un período mucho más breve antes de que la circulación de la sangre se aceptara a escala universal. En Alemania Caspar Hoffman, en Italia Giovanni della Torre, en Francia Primrose, Riolan y Guy Patin (1601-1672) se oponían vivamente a Harvey, que se tomó la molestia de contestar oficialmente sólo a Riolan. Los epítetos que dedicó Patin a la teoría de Harvey fueron «paradójica, inútil, falsa, imposible, absurda, nociva». Dominando la facultad de París, proclamó la irredimible oposición de ésta a toda innovación científica, médica y filosófica, aunque, desde luego, otros franceses como Jean Pecquet (1622-1674) de Dieppe, descubridor del conducto torácico, trabajaban en otra dirección.

Los colegios de médicos no sentían ningún interés por la investigación y los cambios progresistas en el ejercicio de la medicina y miraban firmemente hacia atrás. En París la facultad de medicina, después de la muerte de Luis XIII (1643), logró que se clausurasen las reuniones o *Conférences* organizadas por Theophraste Renaudot en su *Bureau d'Adresse*, donde toda clase de temas se analizaban de manera popular, porque Renaudor se había declarado partidario de nuevos remedios y de dispensarios para proporcionar medicinas gratis a los pobres.[26] La facultad parecía un posible enemigo de las

26. Harcourt Brown, *Scientific organization in seventeenth-century France*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1934, pp. 24, 30.

sociedades científicas de París durante el decenio de 1660, aunque la Academia de las Ciencias acabó haciéndose respetable gracias al patronazgo real y al hecho de concentrarse en ciencias ajenas a la medicina. Todo el mundo conoce el desprecio con que Molière trató a la medicina de la facultad en *Le malade imaginaire* (1673) y en otras obras; menos conocida es la anécdota según la cual Nicolás Boileau escribió al año siguiente (conjuntamente con Racine) un decreto burlesco declarando que la doctrina de la circulación de la sangre era herética e hizo que fuera presentado al primer presidente del *Parlement de Paris* para que lo firmase en lugar de un decreto promovido por la universidad de París para que se prohibiera la enseñanza de la filosofía de Descartes, bloqueando así, por medio del ridículo, el decreto auténtico. Boileau, sin embargo, era hombre de temperamento conservador y, como muchos eruditos (así como médicos) un defensor acérrimo de los «antiguos» contra los «modernos» innovadores.[27]

También en Londres la historia del Colegio de Médicos es en su mayor parte la crónica de la acérrima defensa de los privilegios de sus miembros contra las incursiones de curanderos, apotecarios, cirujanos, extranjeros, comadronas y el rey Carlos I. El Colegio de Médicos no tuvo biblioteca ni museo de hierbas y especímenes hasta que Harvey, ya en las postrimerías de su vida, hizo una donación (1651). Al cabo de unos años, la biblioteca fue muy enriquecida por el culto marqués de Dorchester. Se había contratado a un «operario» o «laborante» químico en 1648 para que preparase medicinas (los apotecarios habían dado este paso veinte años antes), pero esto no quería decir que los «médicos físicos» fuesen ahora aceptados en todas partes. Aunque Harvey albergaba la esperanza de que el colegio se convirtiera en un centro para la ciencia médica y ordenó a sus oradores que exhortasen a los miembros del Colegio a identificar y estudiar los secretos de la naturaleza por medio de experimentos, él mismo (según nos cuenta Aubrey) era uno de los que desconfiaban de los remedios químicos.[28]

En otros sentidos, sin embargo, el Colegio de Médicos londinense fue durante el período republicano semillero de investigaciones médicas. Sus cátedras anuales se dedicaban a los informes de nuevos des-

27. *Idem, Science and the human comedy*, Toronto University Press, Toronto y Buffalo, 1976, pp. 102-103.
28. Clark, *op. cit.*, pp. 309-312.

cubrimientos y, según Walter Charleton, sus miembros eran asiduos disecadores de animales y confirmadores del «invento incomparable» de Harvey. Charleton veía en el colegio (del cual él, por supuesto, era miembro activo) la realización de la Casa de Salomón soñada por Bacon; pese a ello, él y otros no tardarían en desviar su lealtad principal hacia la Royal Society.[29]

El 15 de julio de 1662 el Colegio de Médicos dejó de ser la única asociación docta de la capital poseedora de una carta de privilegios, pues en aquella fecha nació jurídicamente la Royal Society. La especial relación entre los orígenes de la Royal Society y el doctor Jonathan Goddard, respetado miembro del Colegio de Médicos desde 1640, la pertenencia a ella de otros médicos como, por ejemplo, William Petti, Thomas Willis, Walter Charleton y sir George Ent (el heredero más próximo de Harvey) y el interés de la Royal Society por la anatomía y la fisiología —y, de hecho, también por las cuestiones terapéuticas— parecen indicar la existencia de vínculos estrechos entre las dos corporaciones. Al igual que los médicos y los cirujanos, la Royal Society disfrutaba incluso del derecho de obtener los cuerpos de los criminales ejecutados para utilizarlos en la disección. Sin embargo, no había relaciones oficiales entre las dos asociaciones; los anales del Colegio de Médicos no mencionan jamás a la Royal Society. La relación entre ellas la establece primeramente —aparte de algunos distinguidos miembros de las dos— la anécdota según la cual una figura muy respetada del colegio, Baldwin Hamey el joven, contrató a un panfletista vitriólico, Henry Stubbe (que, irónicamente, ejercía sin título la medicina en Bath, ciudad que quedaba fuera de la jurisdicción del colegio) para que atacase a la Royal Society, cosa que Stubbe hizo (en parte) afirmando que dicha institución se proponía socavar los privilegios del Colegio de Médicos y de las universidades. Al parecer, Stubbe logró en cierta medida despertar sentimientos contrarios a la Society en Oxford, pero no hay pruebas de que su malevolencia hallase eco en el colegio londinense.

Cabría caer en la tentación de afirmar que una asociación pertenecía al pasado y la otra al futuro, pero esta proposición apenas resiste el análisis. Se fundaron nuevas corporaciones de médicos inclu-

29. W. Charleton, *The immortality of the soul*, Londres, 1657, pp. 34-35; Robert G. Frank, Jr., Harvey and the Oxford physiologists, California University Press, Berkeley, Los Angeles y Londres, 1980, pp. 24-25.

so en los siglos XVIII y XIX, corporaciones que todavía hoy cumplen importantes funciones profesionales que no son totalmente distintas de las que siempre han cumplido. De hecho, hacen falta organizaciones de ambos tipos: las que fomentan la investigación médica y las que velan por el cumplimiento de las normas profesionales. Si el conservadurismo de Guy Patin o de Hamey nos parece enorme, es fácil encontrar paralelo al mismo en hombres de negocios como sir William Temple, escritores como Swift, filósofos como sir Robert Filmer, por no citar a multitud de teólogos. Quizás en vez de deplorar o resaltar el conservadurismo, el historiador debería señalar el carácter flexible de una sociedad en la que podían coexistir, si no pacíficamente, sí al menos sin destruirse mutuamente, opiniones tan variadas y tan sentidas.

Finalmente, tal vez valga la pena indicar que la ecléctica e importante Royal Society nunca acogió en su seno a dos de los médicos ingleses más famosos: Thomas Browne y Thomas Sydenham. Tampoco el Colegio de Médicos contó jamás entre sus miembros al más famoso de los doctores de medicina de la Inglaterra del siglo XVII: John Locke.

Capítulo 9

ALGUNAS INFLUENCIAS TÉCNICAS

El renacimiento de la ciencia en el siglo XVI y las ideas estratégicas de la primera fase de la revolución científica debieron poco a las mejoras de la técnica de investigación propiamente dicha. Antes de principios del siglo XVII hay pocos testimonios, exceptuados tal vez en la anatomía y la astronomía, de que se hicieran esfuerzos por controlar rigurosamente la corrección de las exposiciones científicas mediante el empleo de nuevos procedimientos, y todavía menos por ampliar su alcance con ayuda de técnicas que la tradición científica desconocía. Ni siquiera el perfeccionamiento de la observación, iniciado en anatomía por Vesalio y sus contemporáneos y en astronomía por Tycho Brahe, significaba algo más que la extensión natural y la aplicación escrupulosa de métodos conocidos. Como los aparatos e instrumentos que existían a la sazón eran toscos y limitados, faltaban los medios para conocer nuevas clases de fenómenos u obtener datos más recónditos que los que ya se estaban estudiando. Aunque se tenía más confianza en la observación y la experimentación, el contenido de la ciencia no podía cambiar espectacularmente, y las demás fuentes de información eran en su mayor parte tradicionales, al menos lo fueron hasta finales del siglo XVI. Aristóteles, Plinio, Dioscórides, Teofrasto y Galeno eran aún muy respetados. Poco a poco, sin embargo, fue ganando terreno la tendencia a complementar esta erudición aprendida en los libros, corroborada mediante el examen personal si era posible, con la experiencia de varios grupos de hombres prácticos. La riqueza de datos aumentó al admitirse las observaciones de artesanos, navegantes, viajeros, médicos, cirujanos y apotecarios, observaciones a las que se consideraba dignas de atención seria y así, andando

el tiempo, mejoró el prestigio de las verdades puramente empíricas, que era apenas inferior al de las verdades sistemáticas de la física o la medicina.

En este sentido, al igual que en otros, la obra de Galileo nos da un útil indicio de un punto decisivo al mostrar de diversas maneras el funcionamiento de nuevos factores, tanto técnicos como conceptuales, del desarrollo de la ciencia. Los logros conceptuales de Galileo fueron de la mayor importancia y suponen una metafísica nueva en vez de la total ausencia de metafísica, pero Galileo también admiraba los logros técnicos de su época y era consciente de los problemas científicos que los mismos planteaban. Revelando el valor de las matemáticas como instrumento lógico para el razonamiento científico, Galileo transformó, por no decir que creó, un importante método de investigación. El hecho de que explorase las potencialidades del telescopio y de otros instrumentos demuestra que le interesaba aumentar el alcance de la observación y la experimentación por medio de técnicas nuevas. Es típico de la evolución del aparato de la ciencia durante el siglo XVII el que los resultados de Galileo fueran más notables por su originalidad cualitativa que por su exactitud cuantitativa, toda vez que la necesidad de precisión en las mediciones era menos manifiesta que las extrañas novedades que las nuevas técnicas iban revelando. Aunque en el siglo XVI cambió mucho la perspectiva con que la ciencia contempla la naturaleza, hasta el siglo XVII no se produjo un cambio cualitativo importante en la imagen misma, cambio al que contribuyeron profundamente los recursos técnicos utilizados por Galileo.

Ya hemos señalado que el ideal de progreso social era también frecuente entre los científicos del siglo XVII y que la consecución de dicho ideal iba vinculada, con más o menos éxito, a la aplicación del conocimiento científico a la tecnología. A la inversa, es claro que la investigación científica misma depende del nivel de pericia técnica, en especial cuando los medios económicos o la organización de la ciencia obligan al experimentador a fiar en la pericia adquirida por el artesano en el ejercicio normal de su oficio, como sucedía antes del siglo XIX. Tal vez sea aún más importante, en las primeras etapas de una ciencia, que el investigador esté abundantemente provisto tanto de problemas como de medios de resolverlos, unos y otros procedentes de la experiencia tecnológica a la que tenga acceso. Se trata en parte de una cuestión de actitudes —la capacidad para recibir el estí-

mulo de una dirección meramente práctica— y en parte de la riqueza de las técnicas. Galileo hace que Sagredo comente, en la primera página de las *Consideraciones y demostraciones*:

> Yo mismo, siendo de naturaleza curioso, frecuentemente visito [el Arsenal de Venecia] por el mero placer de observar el trabajo de aquellos que, a causa de su superioridad sobre otros artesanos, llamamos «hombres de primer rango». Conferenciar con ellos me ha ayudado con frecuencia en la investigación de ciertos efectos incluyendo no sólo aquellos que son sorprendentes, sino también aquellos que son recónditos y casi increíbles. A veces también me han sumido en la confusión y empujado a perder la esperanza de poder explicar alguna vez algo que yo mismo no me explicaba pero que mis sentidos me decían que era cierto.

Es indudable que el diálogo de la Primera Jornada en esta obra estaba influido por esta clase de observación práctica y fue un trabajador quien informó a Galileo del derrumbamiento de la teoría del *horror vacui* cuando se intentó elevar agua a más de 9 metros utilizando una bomba de succión. Bacon también escribió sobre el conocimiento que se ocultaba en la pericia artesanal. En la siguiente generación Boyle dijo que sólo un indigno estudiante de la naturaleza desdeñaría aprender de los artesanos, que eran la mejor fuente de conocimientos; porque

> muchos fenómenos de los oficios son también algunas de las partes más nobles y útiles de la historia natural; porque nos muestran la naturaleza en movimiento y también cuando es desviada de su curso por el poder humano; el cual es el estado más instructivo en el que podemos verla. Y, como las observaciones de aquí tienden, directamente, a la práctica, también pueden proporcionar mucha luz a varias teorías.[1]

Semejantes opiniones no nacían exclusivamente del razonamiento teórico. Expresan la preocupación de la nueva filosofía por las *realia*, pero también reconocen un hecho histórico genuino: que muchas de las operaciones normales que se ejecutaban en el hogar o en el taller escapaban por completo a la explicación científica. Para poner reme-

1. R. Boyle, *Considerations touching the usefulness of experimental natural philosophy*, *Works*, 1772, III, p. 443 (versión abreviada por P. Shaw, I, pp. 129-130).

dio a esto, Galileo empezó la teoría de las estructuras y Boyle inició el estudio de la fermentación en los alimentos. Muchos de los problemas planteados por «el examen interior de los oficios por parte del naturalista» no podían, por supuesto, tratarse muy provechosamente en el siglo XVII y algunos de los más intratables —como la fermentación, por ejemplo— eran, en todo caso, muy antiguos. En cambio, la investigación del geomagnetismo iniciada a finales del siglo XVI es un ejemplo de una rama de la ciencia que nació de las observaciones recientes de los hombres prácticos y que fue seguida con provecho tanto para la teoría como para la práctica. También la medición del tiempo era un problema a la vez científico y comercial, especialmente en relación con la navegación. De manera más obvia, la pericia en trabajar el vidrio y el hierro, especialmente el esmerilado, la tornería y la fabricación de tornillos, podía aplicarse fácilmente a fines científicos. Las formas de mejorar estas artes las buscaban conjuntamente científicos y artesanos, como, por ejemplo, cuando Robert Hooke colaboró con el famoso relojero Thomas Tompion.

En tres ciencias relacionadas —la química, la mineralogía y la metalurgia— la preeminencia del arte sobre la ciencia era muy marcada en los comienzos del siglo XVI. En la filosofía natural existía un conocimiento rudimentario de la clasificación de las gemas, tierras y menas junto con una teoría totalmente inútil sobre la generación y la transformación de las sustancias. La seudociencia —la alquimia— tenía su propia teoría sobre la naturaleza de los metales y sus menas, e incluía cierta información válida sobre los procesos químicos y la preparación de compuestos inorgánicos sencillos. Pero durante los tres siglos anteriores su contenido, que al principio era útil, había sido alterado y oscurecido por el crecimiento del misticismo esotérico y la propagación de absurdos en su nombre. En contraste, los grandes progresos de la industria química, en un momento en que ésta representaba casi el único conjunto racional de conocimientos químicos, apenas se reflejaron en los escritos científicos antes de mediados del siglo XVI. Se produjeron cambios que permitían el uso de nuevos materiales, la economía de la manufacturación o el perfeccionamiento del producto en una larga lista de oficios que en su totalidad dependían de operaciones químicas: la extracción de metales y la refinación de metales preciosos, la fabricación de vidrio y alfarería, la elaboración de soda y jabón, la refinación de sal y salitre y la fabricación de

pólvora, la preparación de ácidos minerales y la destilación. Otras artes químicas como, por ejemplo, los tintes y curtidos, probablemente no se perfeccionaron tanto; algunas innovaciones posteriores, como la refinación del azúcar, despertaron inmediatamente el interés de los científicos. Huelga decir que los conocimientos de los artesanos eran totalmente empíricos; las teorías no les interesaban y eran dados a la superstición y a los prejuicios. Puede que parte de su pericia la obtuvieran de la tradición científica griega a través de fuentes islámicas: el arte de la destilación tenía obviamente tal origen, pero fue perfeccionado por artesanos y no por filósofos o alquimistas. Gran parte de su pericia era el fruto tardío de una larga experiencia. Los conocimientos artesanales de química y las ciencias relacionadas, tomadas en su conjunto, implicaban un conocimiento de los materiales y un dominio de las operaciones muy superior al que poseía el filósofo o el adepto.

A finales del siglo XVI empezaba a nacer algo que parecía una química racional, aunque sesenta años más tarde Boyle aún podía escribir:

> Hay muchos hombres cultos que, estando familiarizados con la química aunque sólo de oídas, han utilizado la incultura, la arrogancia y las imposturas de demasiados que pretenden ser expertos para albergar una opinión pésima tanto del arte como de quienes lo profesan, que son propensos a afligirse cuando ven alguna persona, capaz de triunfar en el estudio de la filosofía sólida, aficionarse a un arte que ellos juzgan muy por debajo de un filósofo ... cuando ven un hombre, familiarizado con otro saber, tolerar con su ejemplo empíricos tiznados y un estudio que ellos juzgan apenas digno para nadie salvo para aquellos que no son aptos para las partes racionales y útiles de la fisiología [ciencia].[2]

Durante el siglo XVI habían aparecido varios libros que, si bien se ocupaban primordialmente de procesos tecnológicos, ejercieron una influencia significativa en el grupo de ciencias químicas. Evitando la teoría, sacudieron el aire de misterio. Describieron de manera práctica cómo las sustancias minerales se encontraban en la naturaleza, eran extraídas y preparadas y cómo, mediante las operaciones del arte, de ellas se extraían productos comerciales. El proceso descrito requería

2. R. Boyle, *Works*, 1772, I, p. 354.

conocimientos mineralógicos y químicos, pericia en la manipulación y, a menudo, una compleja organización económica. Algunas de las minas alemanas ya absorbían grandes desembolsos de capital, y algunos procesos, como la manufacturación de ácido nítrico, que era necesario para separar el oro de la plata, se aplicaban a escala considerable.

El primero de dichos libros fue una pequeña obra en alemán conocida por el *Bergbüchlein* e impresa en Augsburg en 1505.[3] Anteriormente, en el siglo XV, habían circulado manuscritos en alemán que trataban de pirotecnia, de la preparación de salitre y de la manufacturación de pólvora, pero nunca llegaron a imprimirse y, al parecer, no tuvieron importancia para la ciencia.[4] Posiblemente existieron «manuales» parecidos, anteriores al invento de la prensa de imprenta, que hablaban de minería y metalurgia. El *Bergbüchlein* describe brevemente la localización y explotación de las venas de mineral metalífero y le sigue, en el *Probierbüchlein* (impreso por vez primera en 1510 más o menos), una crónica de la extracción, la refinación y el ensayo de oro y plata. Su utilidad la demuestran las numerosas ediciones que se publicaron. Los mismos temas los trataron Biringuccio en 1540, Agricola en 1556 y, ya más avanzado el siglo, otros autores alemanes. El mejor informado de ellos era Lazarus Ercker, superintendente de las minas del Sacro Imperio Romano, cuyo *Tratado sobre menas y ensayos* (Praga, 1574) no se tradujo al inglés hasta 1683.[5] El libro de Ercker es muy práctico y se ocupa principalmente de los metales preciosos, pero tiene capítulos dedicados al cobre y al plomo, al azogue y al salitre. La *Pirotechnia* de Vanoccio Biringuccio y la *De re metallica* de Agricola abarcan una amplia variedad de temas.[6] Biringuccio, por ejemplo —el único autor italiano de una obra importante de este tipo—, describe el horno de cuba, la fundición de bronce y de hierro, y la manufacturación de vidrio, pero los datos técnicos son un tanto inconcretos. El libro de Agricola describe con

3. A. Sisco y C. S. Smith (trad. y ed.), *Bergwerk-und Pröbierbuchlein*, American Institute of Mining and Mechanical Engineers, Nueva York, 1949.

4. W. Hassenstein, *Das feuerkbuch von 1420*, Verlag der Deutschen Technik, Munich, 1941.

5. A. Sisco y C. S. Smith, *Lazarus Ercker's treatise on ores and assaying*, Chicago University Press, Chicago, 1951.

6. M. Gnudi y C. S. Smith, *The pirotechnia of Vannoccio Biringuccio* [1942], Dover, Nueva York, 1959; H. C. y L. H. Hoover, *Georgius Agricola. De re metallica* [1912], Dover, Nueva York, 1950.

gran detalle las formaciones geológicas, la maquinaria minera y los procesos químicos y se le considera justamente como la obra maestra de los primeros escritos tecnológicos. Agricola [*germanice* Georg Bauer] era un erudito que mantenía correspondencia con Erasmo y Melanchthon, escribía en correcto latín y enriquecía sus observaciones con citas apropiadas de los autores clásicos. Escribió también *De natura fossilium* y sobre otros temas científicos. Adquirió sus conocimientos de minería y química industrial durante una larga residencia, en calidad de médico, en las ciudades mineras de Joachimsthal en Bohemia y Chemnitz en Sajonia. Alrededor del primer tercio de su obra *De re metallica* está dedicado al estudio de los métodos mineros. Seguidamente Agricola pasa a describir el ensaye de las menas para determinar su calidad, así como las operaciones de preparación y fundición. Habla del hierro, el cobre, el estaño, el plomo, el bismuto, el antimonio y el azogue además de los metales preciosos. El siguiente tema es el ensaye de los metales básicos para comprobar su contenido de oro y plata y sigue una descripción de cómo se separan los metales preciosos de los básicos y el oro de la plata. Describe aquí por extenso los diversos procesos de copelación, cementación con salitre, licuación mediante el empleo de plomo, amalgamación con mercurio, refinación con estibina y extracción con lo que Agricola denomina *aqua valens*. Al parecer, se trataba de mezcla de ácidos minerales preparados mediante la destilación de distintas mezclas de vitriolos, sal, salitre, alumbre y orina. La última sección de la obra trata de la preparación de «jugos solidificados» —sal, potasa y soda, alumbre, salitre, vitriolos, azufre, betún y vidrio. Aquí Agricola pisaba terreno menos firme y sufrió algunas confusiones y errores.

Esta serie de libros técnicos refleja una tradición de ciencia aplicada que había crecido lentamente durante los últimos siglos de la Edad Media, cuya pericia seguía aumentando gradualmente y era capaz de producir nuevas técnicas para explotar la riqueza sin precedentes de las minas sudamericanas. Los autores, al igual que los anatomistas y herbolarios de la época, aprovechaban plenamente el arte de las ilustraciones grabadas en madera. Su trabajo era tan bueno que duró hasta principios del siglo XVIII, momento en que empezó una nueva era tecnológica; era el libro de Agricola lo que Newton estudió detenidamente cuando estaba investigando la química de los metales. La industria química no se limitó a proporcionar a los quími-

cos de finales del siglo XVI y del siglo XVII los materiales que había en sus laboratorios, sino que también les facilitó una descripción basada en datos de la existencia de minerales en estado natural y de los métodos empleados en su preparación. Es más, en contraste con el fantasioso lenguaje simbólico de los alquimistas, los tratados técnicos hacían una descripción precisa de operaciones y reacciones químicas de índole básica. Además de las obras que ya hemos mencionado, el químico y virtuoso filosófico podía consultar el *Liber Distillandi* de Hieronymus Brunschwig (1512) y sus sucesores para instruirse en ésta, la más necesaria y la más difícil de las artes químicas. Los alquimistas, incluso cuando eran honrados, escribían basándose en el principio de que el lector debía estar iniciado en los secretos o no comprendería nada y que, si ya lo estaba, no necesitaría que continuasen guiándole. Sin embargo, estos autores expusieron lo mejor de sus conocimientos del modo más sencillo posible; y probablemente eran conocimientos sólidos, pues, como comentó Boyle, «los artesanos suelen ser más diligentes, a su modo particular, de lo que sería cualquier otro experimentador cuyo sustento no dependa de ello». Sólo en sus aplicaciones prácticas, reducida a su función esencial consistente en preparar esto a partir de aquello, reposaba la química en unos cimientos realmente sólidos y era independiente de las implicaciones engañosas de teorías falsas y a menudo fantásticas. Pero las operaciones químicas de la industria no eran sólo cualitativamente seguras e instructivas. La aplicación de métodos *cuantitativos* a una reacción química era la esencia del ensaye, por ejemplo, al calcular la cantidad de oro que había en una aleación secando y pesando cuidadosamente un precipitado.

> El ensayador merece tanto crédito como el astrónomo observador por proporcionar datos numéricos y establecer la tradición de la medición exacta sin la cual la ciencia moderna no hubiera podido surgir. Aunque más artesano que científico y más interesado en la utilidad que en la belleza intelectual, el ensayador, sin embargo, recogía gran parte de los datos sobre los que se fundamentó la ciencia química.[7]

Cuando en el siglo XVII se reconoció que la balanza era un instrumento de valor incalculable para la investigación, el químico no hizo

7. Sisco y Smith, *op. cit.* (nota 5), p. XV.

otra cosa que extender la aplicación de una técnica cuya utilidad especializada en el ensaye se conocía desde hacía mucho tiempo. Ni siquiera la ley de la conservación de la masa era algo más que la exposición teórica de una verdad en la que se fundamentaban las operaciones de este oficio.

En cierta ocasión Boyle calificó al alemán de «lengua hermética» por el hecho de que la hubieran utilizado tantos alquimistas. Quizá sería más útil decir que la química racional empezó con descripciones de la compleja industria química de Alemania y fue continuada por experimentadores alemanes, algunos de ellos inspirados por Paracelso, que era suizo alemán. Aquí parece haber una razón clara para creer que el desarrollo de un arte técnico hasta el punto necesario de complejidad y excelencia proporcionó gran parte de la base objetiva y del método de la que pudieron surgir las ciencias experimentales. Por supuesto, las raíces de la química, la mineralogía y la metalurgia modernas también se encuentran en la alquimia, la farmacia y la filosofía. La descripción de operaciones prácticas contribuyó muy poco a la formulación de teorías químicas en los siglos XVII y XVIII. Las ideas procedían de fuentes diversas; y existía incluso una tradición confusa y terca de labor de laboratorio en la alquimia que era paralela a las operaciones a escala industrial. Sin embargo, en muchos sentidos la perspectiva de Black o de Lavoisier se parece a la del ensayador práctico más que la perspectiva esotérica de Ramon Llull, Paracelso o «Basil Valentine». La influencia del artesano, al que se concibe más próximo a las realidades de la naturaleza que el filósofo abstraído, fue un elemento importante en muchas de las ciencias nacientes, pero en ninguna parte lo fue más que en la química, que era la que más requería una alianza del mismo pensamiento y la actividad razonada.

Hasta aquí en este capítulo hemos comentado sólo algunos ejemplos de lo que podríamos llamar «las raíces técnicas inconscientes de la ciencia», esto es, la información relativa al dominio práctico de la naturaleza que se encontraba en libros impresos antes de comenzar el siglo XVII y que era quizá complementada con visitas a los astilleros, talleres y fundiciones, y con conversaciones con las personas que trabajaban en tales lugares. Dista mucho de estar claro para quién se escribieron los diversos libros que acabamos de comentar y sus sucesores del siglo XVII, de los cuales *Mechanick exercises* (1678), de Joseph Moxon, es un obvio ejemplo inglés; pero es sin duda pro-

bable que fueran dirigidos a los aspirantes en algún oficio o profesión más que a los aficionados, los filósofos o los matemáticos. Si en el decenio de 1680 Newton, allá en Cambridge, realmente estudió con detenimiento el libro de Agricola, *De re metallica*, en busca de una visión clara de la filosofía de los metales, ésta fue sin duda una forma de utilizar dicho libro que el autor del mismo no pudo prever. En el siglo XVII, sin embargo, comenzaron a aparecer libros técnicos dirigidos específicamente al caballero aficionado, al curioso, al filósofo rural y tal vez en especial al reformador agrícola; en efecto, uno de tales libros, escrito por Walter Blith, se titula *The English improver, or a new survey of husbandry* (1649) y se reeditó con el título de *The English improver improved* (1652). Para mejorar una finca hacían falta toda clase de artes técnicas: contabilidad, agrimensura, drenaje de tierras, geología de campo, mecánica práctica, química y botánica agrícolas, cría de animales y arquitectura (cuando menos para la casa del propietario). Durante el período de la Commonwealth Hartlib y sus colaboradores hicieron muchos esfuerzos precisamente por alentar al reformador mediante publicaciones tales como *Discourse of husbandrie used in Brabant and Flanders; shewing the wonderful improvement of land there* (1650) o *An essay for the advancement of husbandry-learning. Or propositions for the erection of a College of Husbandry* (1651), de sir Richard Weston, y *Treatise of fruit-trees* (1653), de Ralph Austen. El propio Hartlib utilizó información suministrada por Weston (que fue el principal precursor en Inglaterra del cultivo de plantas leguminosas como el pipirigallo para piensos), el misterioso Cressy Dymock y otros para escribir *Samuel Hartlib: his legacy* (1652).

Este interés por la agricultura lo continuó la Royal Society, que distribuyó un cuestionario entre los agricultores de Inglaterra. Se recibieron varias respuestas detalladas a dicho cuestionario, cuyo título era *Enquiries*. Con él se pretendía sobre todo recopilar «una Buena Historia [Crónica] de la Agricultura» y recomendar los mejores métodos que se empleaban en regiones determinadas para su utilización general en todas partes;[8] sin embargo, parece ser que a veces la gente del campo contemplaba semejante «curiosidad» con

8. Fueron publicadas en *Phil. Trans.* n.° 5, julio de 1665, pp. 82-94. Para las respuestas, véase A. R. y M. B. Hall, *Correspondence of Henry Oldenburg*, VII, pp. 294-299 (1670), VIII, pp. 344-348 (1671).

suspicacia, quizá temerosa de tener que pagar algún nuevo impuesto sobre su prosperidad. De esta actividad no surgió ningún resultado público, aunque es muy posible que en privado se estimulara el perfeccionamiento de la agricultura mediante, por ejemplo, el cultivo de nabos para forraje, que se estaba iniciando por aquel entonces, hasta que John Houghton, miembro de la Royal Society, publicó dos series tituladas *Collections for the Improvement of Husbandry & Trade* (1681-1683; 1692-1703). La larga duración de la segunda serie, que ocupó diecinueve volúmenes, indica que encontró lectores. Houghton se inspiró mucho, cuando menos al principio, en las tradiciones que se remontaban al círculo de Hartlib.

En el mismo círculo tuvieron su origen las series paralelas sobre «historias de oficios», algunas de las cuales fueron publicadas en *History of the Royal Society* (1667), de Sprat, y otras en las *Philosophical Transactions.* Del programa para esta empresa que William Petty trazaba en *The advice of W. P. to Mr. S. Hartlib for the advancement of some particular parts of learning* (1648) se había dicho que era «el principal libro de texto para la historia de los oficios».[9] Otros hombres famosos que participaron igualmente en ello fueron Boyle y John Evelyn (1620-1706), el diarista, cuya larga lucha por la repoblación forestal de Inglaterra no debería olvidarse en este mismo contexto. Años más tarde Evelyn se interesó de manera especial por el oficio de jardinero y tradujo una obra de éxito que sobre este tema escribió el francés Jean de la Quintinie, que también mantenía correspondencia directa con la Royal Society. El gusto artístico de Evelyn le indujo a escribir *Sculptura* (1662), que era una crónica del arte de grabar sobre cobre. También redactó informes sobre la elaboración del pan y el «jaspeado» del papel. Boyle escribió con entusiasmo sobre la historia del comercio y la utilidad del conocimiento artesanal en su *Usefulness of experimental natural philosophy* (1663), libro escrito muchos años antes de su publicación. A mediados del decenio de 1660, cuando Sprat estaba recopilando su libro, el interés seguía siendo grande:

> Las historias que han recopilado son de la naturaleza, las artes o los trabajos. Éstas las han empezado a recoger por el método más sencillo, y partiendo de la información más sencilla. Han cogido su

9. Walter E. Houghton, jr., en *Journal of the History of Ideas*, 2 (1941), pp. 33-60.

información del uso constante e infalible de hombres experimentados de los tipos de vida más sencillos y más naturales. Ya han hecho muchas cosas de esta manera y pueden prometer al mundo que harán más en un espacio de tiempo muy corto.[10]

Pero en 1667, al publicarse su *History of the Royal Society*, el impulso principal ya había disminuido. La descripción de los métodos artesanales se veía desplazada por otros focos de interés como, por ejemplo, la bomba de aire: «su contribución a la ciencia ya no fue necesaria cuando los laboratorios crecieron en número y eficiencia, y cuando el método de la hipótesis suplantó a la simple recogida de datos experimentales».[11] O tal vez sería preferible decir «cuando la investigación científica precisa suplantó a la recogida prolija de información de segunda mano».

Todo esto tuvo mucho de fenómeno inglés, pues hubo pocos hechos análogos en el continente, si es que hubo alguno, aunque el infatigable Oldenburg recibió unas cuantas descripciones de oficios de sus corresponsales en el extranjero. De modo parecido, la publicación de «libros de máquinas» era una tradición de la Europa continental sin paralelo en Inglaterra.[12] Como ya hemos señalado, la Academia de las Ciencias de París, tal vez no del todo por voluntad propia, se interesó mucho más que la Royal Society por la construcción de maquinaria. En cambio, en diversos momentos las cuestiones relativas a la construcción de buques y a la navegación preocuparon a muchos países. Galileo perfeccionó sus observaciones de los satélites de Júpiter hasta alcanzar un grado muy alto de precisión, teniendo parcialmente en cuenta la utilidad de sus apariciones y desapariciones, si podían predecirse correctamente para tiempos futuros, a guisa de reloj celeste que sirviera para determinar la longitud en el mar.[13] Proyectó una silla de observación que se utilizaría a bordo y entabló imparcialmente debates con los gobiernos de España y los Países Bajos. Más adelante, Christiaan Huygens prosiguió con energía

10. T. Sprat, *History of the Royal Society*, Londres, 1967, p. 257.
11. Houghton, *loc. cit.*, 60. Es extraño dar a entender que Boyle, Grew, Ray y Newton utilizaron el «método de la hipótesis».
12. Véase A. G. Keller, *Theatre of machines*, Chapman and Hall, Londres, 1964, y M. T. Gnudi (trad.), *The various and ingenious machines of... Ramelli* [1588], Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1976.
13. Stillman Drake, *Galileo at work*, University of Chicago Press, Chicago y Londres, 1978, pp. 193-194.

la búsqueda de la longitud, empleando para ello el reloj mecánico: sus principios eran perfectamente correctos con la salvedad de que optó por hacer caso omiso del problema de la compensación de la temperatura, sobre el cual, de hecho, le llamó la atención sir Robert Moray, pero sus relojeros no poseían un nivel de destreza suficientemente elevado.[14] Otro que abordó el mismo problema fue Robert Hooke, el versátil filósofo y experimentador que, a diferencia de Huygens, nunca llegó a producir un cronómetro para pruebas marítimas,[15] también Leibniz publicó un proyecto para este fin. La navegación y el problema de la longitud se contaban entre los incentivos más poderosos para la fundación de observatorios nacionales en Francia e Inglaterra; Cassini prosiguió el estudio intensivo de Júpiter y sus satélites iniciado por Galileo, a la vez que tanto él como Flamsteed en Greenwich intentaban trazar y resolver los movimientos lunares, puesto que la Luna era un cronómetro potencial todavía más obvio. La medición precisa de las ocultaciones de los satélites del planeta permitió a Ole Roemer descubrir (1676) la velocidad finita de la luz, detectable cuando la línea de visión a Júpiter cruza o no cruza el diámetro de la órbita de la Tierra.[16]

Tanto la construcción de barcos como el navegar en ellos parecían cuestiones que podían analizarse aplicando los principios de la mecánica. Puede que el navegante, por ejemplo, cuando el viento le es adverso tenga que responder a la siguiente pregunta: ¿debería navegar siempre ciñendo el viento tanto como sea posible y así, punteando, acortar la distancia tanto como pueda, o, por contra, debería optar por incrementar las millas por recorrer y la velocidad navegando con un ángulo de mayor desviación respecto a la dirección del viento? Esto lo abordó primero, como problema de mecánica, el jesuita francés Ignace Pardies (1636-1673) —que sostuvo una caballeresca disputa sobre óptica con Newton—;[17] después se ocuparon de ello Huygens y los numerosos matemáticos excelentes que hubo en el siglo XVIII, incluyendo a Johann Bernoulli, Pierre Bouguer y Leonhard Euler. La construcción, en lo que se refería a los físicos,

14. M. Mahoney en H. J. M. Bos y otros, eds., *Studies on Christiaan Huygens*, Swets and Zeitlinger, Lisse, 1980, pp. 234-270.

15. A. R. Hall in *Studia Copernica*, 16 (1978), pp. 261-281.

16. René Taton, ed., *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978.

17. A. Ziggelaar, *Le physicien I. G. Pardies*, Odense University Press, Odense, 1971, pp. 137-138.

dependía de la forma de los barcos (la velocidad con que surcan las aguas) y de su estabilidad: los navíos de guerra en especial, cargados como iban de cañones, corrían el peligro de zozobrar, como le ocurrió en 1628 al *Vasa*, buque de la marina sueca que acababa de ser puesto en servicio. En los astilleros de todos los países se empleaban métodos tradicionales en los que no se podía confiar, al menos en la medida en que, por ninguna razón obvia, a veces un barco recién construido resultaba muy distinto de lo que se esperaba y a veces era tan peligroso que había que hacer modificaciones en él. Huygens hizo algunos estudios sobre la resistencia, Newton publicó en los *Principia* la primera proposición geométrica relativa a la forma ideal que debían tener las amuras de un buque, mientras que Johann Bernoulli fue el primero en investigar la estabilidad. Antes de que el siglo tocara a su fin también se sugirió que experimentar con modelos podía ser útil para perfeccionar el diseño de los barcos.[18] En cierto sentido, esta fue la política que siguió sir William Petty, que construyó sucesivamente un modelo y luego cuatro veleros pequeños con el objeto de justificar su fe en el tipo de construcción de dos cascos o catamarán. De los tres que se construyeron en 1662-1664, el último, *The Experiment*, se perdió a causa de una gran tormenta en el golfo de Vizcaya; el cuarto velero nunca dio buenos resultados.

Otro campo de actividad para los matemáticos era la balística. Después de que Galileo primero descubriera experimentalmente y luego demostrara geométricamente que la trayectoria de un proyectil es una parábola —siempre y cuando se haga caso omiso de la resistencia del aire, la curvatura de la Tierra, las fuerzas de Coriolis, etcétera—, una serie de autores —Torricelli entre los primeros— calcularon las consecuencias de esta sencilla teoría: cómo, por ejemplo, el alcance de tiro se ve afectado por la inclinación hacia arriba o hacia abajo del terreno. Varios autores, el más conocido de los cuales es tal vez François Blondel, presentaron, en *L'art de jetter les bombes* (1683), la teoría parabólica mediante una serie de tablas con el fin de que pudiera utilizarla en el campo de batalla un artillero razonablemente instruido (si fue o no utilizada es otra cuestión). En privado, la teoría parabólica la descubrió independientemente Tomás

18. Véase A. R. Hall, «Architectura navalis» en *Transactions of the Newcomen Society*, 51 (1979-1980).

Harriot, que, comprendiendo que la forma perfecta de la parábola debía modificarse a causa de la resistencia que el aire oponía al proyectil, también pensó que esta falta de simetría podía representarse inclinando el eje de la parábola, con lo cual el descenso del proyectil (correctamente) sería más abrupto que la ascensión, como, a decir verdad, Leonardo da Vinci ya había comprendido mucho antes. Curiosamente, el primer matemático que abordó en público el asunto de la resistencia del aire, James Gregory (1672), empleó exactamente el mismo recurso que Harriot para representarla. Huygens y Newton, éste en sus *Principia*, hicieron (privadamente) estudios analíticos del efecto de la resistencia del aire en el movimiento; ni uno ni otro dio de forma general la curva para un caso realista. Esto lo hizo Johann Bernoulli en 1719. Ninguno de estos complejos análisis matemáticos revestía el menor interés para los artilleros prácticos, pues no eran más que un campo de entrenamiento para la pericia en el cálculo; la sencilla teoría parabólica proporcionaría cuando menos una guía aproximada del comportamiento de las bombas de mortero, que se movían con lentitud.[19] Los proyectiles de los siglos XVII y XVIII salían del cañón o del mortero de un modo tan incierto en lo que hace a su dirección y velocidad precisas, y surcaban el aire de forma tan irregular que la precisión en los cálculos de balística era completamente inútil, y tampoco habría sido posible asimilarlos (en general) a las condiciones reales de la guerra.

En estos últimos párrafos he querido demostrar de qué manera los «oficios» sugerían problemas a los filósofos de la naturaleza y a los matemáticos, o (por decirlo a la inversa) cómo estos hombres, al investigar, encontraban proposiciones que brindaban la posibilidad de una aplicación práctica. Así fue, y se trata de un ejemplo clásico, cómo Christiaan Huygens se dio cuenta de que si el «fluido elástico» contenido en una vasija podía enrarecerse mucho por efecto del calor, al enfriarse éste la presión atmosférica externa podía efectuar un trabajo, por ejemplo, empujando un pistón hacia abajo. Así, pues, el principio del motor accionado por calor atmosférico era conocido desde por lo menos 1675. También podía suceder que la idea se le ocurriera a una tercera persona, por ejemplo al desconocido que en el siglo XVII inventó el fusil de aire comprimido a partir de la bomba

19. A. R. Hall, *Ballistics in the seventeenth century*, Cambridge U. P., Cambridge, 1952. Mi conocimiento de la obra de Harriot se lo debo a D. T. Whiteside.

de aire: quizá para algunos era un juguete, pero con él se equipó a los soldados austríacos que luchaban contra Napoleón y los franceses lo consideraron un arma mortalmente certera y antinatural. Huelga decir que también cabría afirmar que el interés por la reproducción de los animales y la fisiología de las plantas es cuando menos tan «práctico» como «filosófico»; ciertamente, el interés por las ciencias médicas (anatomía, fisiología, farmacología, patología, etcétera) se prestaba mucho a ser clasificado como «práctico» en el sentido de que la preservación de la salud interesa de modo muy directo a todos los hombres. La medicina y la cirugía podrían, en este sentido, incluirse entre los «oficios».[20]

Decir que los filósofos y los matemáticos investigaron una serie bastante amplia de cuestiones que, cuando menos, parecían pertinentes al amplio mundo de los barcos, las coles y el lacre no equivale a argüir que esto fuera lo *único* que hacían o sobre lo que escribían. Una proporción muy grande de los escritos correspondientes a las ciencias matemáticas, experimentales y médicas era sumamente didáctica: transmitía instrucciones sobre datos y técnicas, no sobre la manera de resolver problemas. En la medida en que los hombres escribían o hablaban sobre actividades encaminadas a la resolución de problemas, parecen mucho más interesados por el avance del conocimiento que por cosechar beneficios. Se dedicaron muchísimos esfuerzos al avance de las líneas de pensamiento existentes o bien a crear otras nuevas, o sencillamente a hacer más aportaciones al caudal de conocimientos escritos. En los *Principia* de Newton hay casi doscientas proposiciones numeradas sin contar lemas y corolarios; de éstas, una parece aplicable a la artillería y otra a la construcción naval. La proporción no es muy alta. Hace muchos años, como uno de los elementos de un estudio clásico, Robert K. Merton escogió cuatro años del siglo XVII e hizo una tabulación, en términos de «ciencia pura» y de «ciencia relacionada con necesidades socioeconómicas», de los temas planteados o tratados en las reuniones de la Royal Society: su conclusión fue que sólo alrededor del 41 por ciento entraban en la categoría de «ciencia pura», mientras que el 59 por ciento eran útiles (en potencia) de un modo u otro.[21] Nadie sabe mejor que

20. G. N. Clark, *Science and social welfare in the age of Newton*, Clarendon Press, Oxford U. P., Oxford, 1937, 1949.
21. Robert K. Merton, «Science, technology and society in seventeenth-century England», *Osiris*, IV (1938), Nueva York, 1970, tabla 13, p. 204.

Merton que esta proporción no puede extenderse a una valoración de las realizaciones científicas, o que, si colocáramos los libros «puros» en un plato de la balanza y los libros «aplicados» en el otro, los primeros preponderarían en gran medida. Lo que se decía en las reuniones de la Royal Society no es más que un barómetro de la presión de la ciencia sobre la sociedad, un barómetro que no es por fuerza completamente fiel o apto para juzgar, toda vez que depende de la apreciación subjetiva del clasificador. Tampoco debe darse demasiado crédito, cualitativamente, a una afirmación tan retórica como ésta de Hooke «[los miembros de la Royal Society] no rechazan totalmente los experimentos de simple luz y teoría; mas apuntan principalmente a aquellos cuyas aplicaciones mejorarán y facilitarán el actual estado de las Artes Manuales».[22] La exageración es casi absurda. Desde luego, no se ve ninguna selección parecida en el libro que Hooke estaba presentando o en su propia obra posterior. El utilitarismo de la Royal Society, tan traído y llevado, quedará disminuido al apreciarse la inmensa diferencia que hay entre lo que los hombres dicen, o incluso suponen que hacen, y lo que consiguen de manera natural.

Además, como dice un gran historiador al examinar este asunto: «El deseo desinteresado de saber, el impulso de la mente de ejercerse metódicamente y sin ningún propósito práctico, es un motivo independiente y único» para el estudio de las matemáticas y de la filosofía natural, así como de otros temas. Este deseo de conocer ya estaba institucionalizado en las universidades de Europa, en cuyos cimientos se hallaba el amor desinteresado por la verdad. Aunque algunos resultados del movimiento científico penetraron hasta la práctica y fueron aplicados: «En cambio, la mayor parte de la labor científica que se hacía entonces no dio ningún resultado práctico hasta mucho después; el crecimiento de la ciencia, limitado por las leyes de su propia coherencia y por la del universo, sólo aquí y allá tocaba las necesidades de la vida humana».[23]

La invención de numerosos instrumentos científicos durante el siglo XVII y su fértil utilización en muchas capacidades se asocian desde hace mucho tiempo con la revolución del pensamiento y el método científicos. La idea de la ciencia como producto de labora-

22. Robert Hooke, *Micrographia*, Londres, 1665, Prefacio.
23. G. N. Clark, *loc. cit.* (en nota 20), pp. 186-189.

torio (en el sentido moderno de la palabra) es en verdad uno de los puntos de la revolución científica. En ningún período anterior había existido un vínculo especial entre el estudio de la filosofía natural o de la medicina y la utilización de técnicas especializadas o instrumentos de investigación y, aunque el cirujano o el astrónomo contaban con una gama limitada de instrumentos, poca atención se prestaba a si éstos eran idóneos para ser utilizados y a la posibilidad de extender y perfeccionar sus aplicaciones. Durante el último medio siglo de su empleo en Europa (*c.* 1575-1625), y en mayor número que que en toda su historia anterior se proyectaron nuevas variantes del astrolabio, el más característico de todos los instrumentos científicos medievales. Los griegos conocían la facultad amplificadora de una vasija esférica llena de agua, pero la lente fue un invento del siglo XI; el cristal para anteojos, del siglo XIII; y el instrumento óptico, del siglo XVII. Los instrumentos de navegación también era extremadamente toscos antes de finales del siglo XVI. No se trata de una total falta de ingenio y destreza (pues muchos ejemplos de metalistería, para fines artísticos y militares, demuestran lo contrario); lo que faltaba era más bien la voluntad de refinar y extender las técnicas instrumentales. Por otro lado, se ha señalado acertadamente que las primeras etapas estratégicas de la revolución científica tuvieron lugar sin la ayuda de los nuevos instrumentos. Eran desconocidos para Copérnico, para Vesalio, para Harvey, Bacon y Gilbert. Está claro que, por grande que fuese la influencia que el ingenio instrumental del siglo XVII ejerció en la marcha de la ciencia moderna, dicho ingenio no fue el causante de que la ciencia se desviara en principio en la nueva dirección.

Diríase, pues, que el primer factor que limitó la introducción en la práctica científica de criterios más altos de observación y medición, o de manipulaciones más complejas, residía en la naturaleza de la ciencia misma. Hasta después de que cambiara el concepto de la investigación científica, cosa que ocurrió al finalizar el primer cuarto del siglo XVII, no fue posible prestar atención al logro de estos criterios más altos. Varios instrumentos nuevos del siglo XVII no fueron fruto de la invención científica, sino que se adoptaron para fines científicos porque el cambio de actitud permitió que se reconociera su utilidad. La balanza se tomó en préstamo de la química. El telescopio lo empezaron a utilizar los artesanos, inicialmente para fines militares. El microscopio fue un juguete divertido antes de transfor-

marse en un instrumento serio para la investigación. La bomba de aire que se empleaba en el laboratorio era una forma perfeccionada de la vulgar bomba de pozo o jeringa. E inevitablemente, las técnicas que se utilizaban en la construcción de los nuevos instrumentos eran las que ya existían; no surgieron de la nada a causa de la inaudita demanda científica. Algunos instrumentos eran practicables sólo porque los métodos que se empleaban para hacer girar los tornos y para fabricar tornillos se habían perfeccionado gradualmente durante dos o tres siglos, debido en parte a que era más fácil disponer de herramientas de acero; otros, porque era posible producir planchas o cintas de metal más grandes, más resistentes y más lisas. Las técnicas de esmerilado y soplado de vidrio para producir lentes y tubos hubieran podido destinarse al uso científico mucho antes. El fabricante de astrolabios podía aplicar su pericia a la fabricación de otros instrumentos en los que hubiera círculos divididos y líneas grabadas; el relojero, a varias calculadoras y modelos que tuviesen engranajes de ruedas de gran precisión, y así sucesivamente. Las habilidades artesanas comunes eran una considerable mina de ingenio cuando la imaginación científica recurría ella.

Por otra parte, una vez creado el interés por la clase de resultados que podían obtenerse del empleo de instrumentos especializados, sobre todo cuando este empleo comenzó a extenderse, bajo una dirección más disciplinada, hacia una mayor profundidad cualitativa en la información y una mayor exactitud cuantitativa en la medición, pronto se llegó a las limitaciones de la artesanía normal. Entonces fue necesario llevar a cabo un examen más concienzudo de los instrumentos propiamente dichos. Descartes fue virtualmente el fundador del estudio científico de los aparatos científicos, al investigar las causas de la distorsión de las imágenes en los telescopios toscos. (Al mismo tiempo se estaban tomando medidas puramente empíricas para remediar sus defectos.) Descartes concluyó que las lentes debían esmerilarse hasta darles una curvatura no esférica, lo cual haría que su fabricación fuese más compleja. Algunos científicos (entre ellos el astrónomo Hevelio y el microscopista Leeuwenhoek) llegaron a ser maestros en el arte de esmerilar los lentes que necesitaban para su labor; otros, como Newton, hicieron experimentos con otros instrumentos ópticos. Hacia las postrimerías del siglo el científico, si deseaba tener un telescopio realmente bueno, ya no podía aprovechar simplemente la artesanía; tenía que encauzar el

trabajo de acuerdo con una especificación determinada de antemano. Al finalizar el siglo XVI la astronomía ya había alcanzado el punto en que los nuevos avances de la precisión llevaban aparejado un gran esfuerzo. Dispositivos como la escala vernier o nonio y el tornillo tangente constituyeron avances importantes y el acoplamiento de telescopios a los instrumentos para medir ángulos redujo los errores de observación. Pero todas las ventajas obtenidas de la mayor complejidad de la construcción mecánica dependían del perfeccionamiento progresivo de la mano de obra, así como de la presciencia y la supervisión del científico. De hecho, el astrónomo debía considerar su observatorio como un ejercicio de proyección; tenía que construir paredes debidamente orientadas que no hicieran asiento, diseñar cuadrantes que fuesen rígidos y al mismo tiempo ligeros y exactos; descubrir los probables errores de las escalas divididas; colimar sus telescopios y ajustar sus relojes. El astrónomo se había percatado de que las limitaciones a su trabajo las imponían factores principalmente técnicos y mecánicos. Como tales, estos factores merecían, y recibían, una atención cada vez más meticulosa.

Desde el punto de vista histórico, los instrumentos se dividen en dos clases: los que sólo proporcionan información cualitativa y los que permiten hacer mediciones. Como es natural, estas aplicaciones de un instrumento no son necesariamente exclusivas; de hecho, basta reflexionar un poco para que resulte obvio que en su evolución la mayoría de los primeros instrumentos científicos tendieron a entrar en la segunda clase. Así, artificios como el micrómetro pudieron agregarse a telescopios y microscopios para medir objetos muy pequeños o muy lejanos; también podían añadirse estos sistemas ópticos a otros instrumentos de medición para mejorar su rendimiento. Pero el *primer* uso era puramente cualitativo. De modo parecido, en el siglo XVIII el electrómetro creado en principio para detectar cargas de electricidad se usó posteriormente para comparar y medir las mismas. La balanza se utilizó primero en química para comprobar las sencillas pérdidas o ganancias de peso; su empleo para determinar con precisión las masas en una reacción química vino mucho después. Por consiguiente, es natural y plausible decir que las potencialidades cuantitativas de un nuevo instrumento o aparato se aprecian, por regla general, con menor facilidad que las cualitativas, hecho que se daba muy especialmente en los siglos XVII y XVIII. Así, pues, la invención de instrumentos no tuvo el efecto inmediato que cabía

esperar *a priori*: inducir a un mayor rigor y a un mayor interés por la medición precisa. El barómetro, por ejemplo, lo inventó Torricelli en 1643. Al principio se utilizaba para demostrar la existencia de la presión atmosférica y, en segundo lugar, para practicar el vacío en una pequeña cámara formada en la parte superior del tubo en el que podían efectuarse experimentos. Hasta alrededor de 1660 no se descubrió la correlación entre la presión barométrica y las condiciones climáticas y hasta después de este descubrimiento no se intentó mejorar la legibilidad del instrumento y preparar una «historia del tiempo». Más tarde todavía Boyle empleó el barómetro como manómetro para medir la calidad del vacío formado por sus bombas de aire, así como la cantidad de «aire» que desprendían las fermentaciones. El termómetro tiene una historia aún más larga y sorprendente como instrumento meramente cualitativo. El termoscopio, instrumento en el que la expansión del aire en una bola hacía subir una columna de agua en un tubo estrecho cuando se le aplicaba calor, lo inventó Galileo en 1600 más o menos. Los termómetros líquidos fueron introducidos aproximadamente a mediados del siglo y se usaron mucho en la Accademia del Cimento, pero ninguno de éstos estaba graduado. Las primeras sugerencias de graduación sistemática mediante el uso de dos puntos fijos se hicieron alrededor de 1665; la escala de Fahrenheit data de unos cincuenta años después y la moderna escala centígrada no se ideó hasta 1743. Así, pues, el primer siglo de termometría no produjo ninguna medición cuantitativa que ahora podamos interpretar con algún grado de confianza.[24]

Si bien los astrónomos del siglo XVII, continuando una larga tradición, perfeccionaron la medición angular —fruto de ello fue la *Historia coelestis Britannica* (1725) de Flamsteed—, en los campos de la física y la biología los resultados cualitativos fueron mucho más significativos. Incluso la medición angular terrestre (en la agrimensura y la geodesia), que era una ciencia afín, siguió siendo bastante tosca hasta que a finales de siglo se introdujeron las escalas vernier y las miras telescópicas. Por lo tanto, no cabe afirmar que las limitaciones *técnicas* a la precisión de las mediciones fueran significativas en cualquier rama de la ciencia, exceptuando la astronomía, antes de

24. Aunque los tubos de los primeros termómetros mostraban divisiones, éstas eran arbitrarias y no comparables. En contraste, una división de una pulgada (2,5 cm) en un barómetro tiene sentido... ¡siempre y cuando uno sepa la pulgada estándar que se ha empleado!

los comienzos del siglo XVIII. Ciertamente, se ha argüido que la química hubiera progresado más aprisa, y que la ciencia del calor habría sido más sistemática, si se hubiese prestado más atención a los aspectos cuantitativos de la experimentación; pero las razones del descuido de tales aspectos hay que buscarlas en la naturaleza de la actividad científica del siglo XVII más que en deficiencias instrumentales. No se comprendía suficientemente la importancia de las mediciones exactas y, por ende, raras veces se hacían; de modo que la textura de la ciencia era lo que obstaculizaba la explotación eficaz de artificios que ya existían en lugar de ser viceversa.

Por otro lado, en lo que se refiere a los dos instrumentos cualitativos que tan notablemente abrieron nuevos y grandes campos de actividad, el telescopio y el microscopio, es evidente que las limitaciones técnicas pronto revistieron gravedad y que su naturaleza era bien comprendida. Ambos instrumentos eran muy toscos al principio.[25] Hasta 1640 más o menos los sistemas de lentes convexas no comenzaron a sustituir gradualmente la combinación cóncava-convexa (el denominado «sistema galileano»), pues fue en 1640 cuando empezaron a entenderse mejor las reglas para calcular las distancias y aberturas focales apropiadas. Los primeros microscopios compuestos auténticos datan aproximadamente de este período, y el nuevo telescopio (kepleriano) permitió ver más detalles del sistema solar. Se descubrieron más satélites; se explicó la misteriosa apariencia de Saturno; tránsitos y ocultaciones podían observarse con mayor exactitud. Pero el gran desiderátum de la astronomía del siglo XVII —una prueba basada en la observación de la rotación de la Tierra— no llegó a alcanzarse. Para obtener una amplificación mayor sin que ello produjera un aumento de la aberración, el astrónomo tenía que valerse de distancias focales enormes y aberturas pequeñas. La facultad de recolectar luz de tales instrumentos era deficiente y pronto se alcanzó el límite práctico de la distancia (unos treinta metros). Teóricamente resultaba imposible obtenerlas. La teoría óptica de Newton explicó la naturaleza de la aberración cromática sin sugerir un remedio apropiado, puesto que Newton comprobó que los distintos colores en que puede resolverse la luz blanca no podían enfocarse de una

25. La evolución en 1608 del telescopio o catalejo holandés (o galileano) a partir de los intentos de mejorar la visión defectuosa mediante combinaciones de lentes la ha estudiado A. Van Helden en *Trans. Amer. Phil. Soc.*, 67 (1977).

sola vez por medio de una lente sencilla. El telescopio reflector, libre de aberración cromática, fue idea de James Gregory y el primero en construirlo fue Newton, pero tuvo escaso valor para los astrónomos hasta las postrimerías del siglo XVIII.

En el caso del microscopio surgieron problemas similares. Los cristales sencillos, con amplificación de unos diez diámetros, ya se usaban a principios del siglo XVII. Harvey los empleaba para observar los latidos del corazón de los insectos. También los usaba Francesco Stelluti, que en 1625 publicó un estudio microscópico de las abejas. El pequeño «cristal pulga» tubular, con la lente montada en un extremo, y el objeto colocado sobre una placa de vidrio en el otro, se hizo popular entre los virtuosos. Hacia mediados de siglo el microscopio compuesto despertó renovado interés y empezaron a construirlo con un objetivo biconvexo y lente ocular, con una lente de campo plano-convexo colocada entre ellos para concentrar los rayos. En la versión perfeccionada de Hooke (descrita en *Micrographia*, 1665), el cuerpo, dotado de portaoculares, estaba montado de modo que pudiera inclinarse hasta formar un ángulo conveniente; el portaobjetivo era largo e iba engranado en una tuerca grande, para que, atornillándolo hacia fuera o hacia dentro, pudiese enfocarse el objeto. El método de ajuste consistente en tornillo de avance y corredera lo inventó Hevelio más adelante. Para iluminar los objetos opacos Hooke recurría a un velón y una lente abombada; antes de que se dotara al microscopio de un espejo reflectante (en 1720 aproximadamente) los objetos transparentes se examinaban colocando una lámpara o una bujía en el suelo, debajo del instrumento, que a menudo tenía la base perforada. El microscopio compuesto era complicado y extenso, pero fácil de manejar y su diseño mecánico fue haciéndose cada vez más eficaz. En lo que se refiere a la óptica, era menos satisfactorio. Permitía obtener aumentos de más de cien diámetros, pero las lentes no corregidas, cuyo cristal era de poca calidad, daban una resolución baja. A resultas de ello, pronto se llegaba al punto en que, si bien podía hacerse que el objeto pareciera mayor, no era posible ver sus detalles más pequeños. Desde 1665 hasta más o menos 1830, momento en que ya existían buenas lentes corregidas, el microscopio compuesto avanzó relativamente poco en lo que se refiere a propiedades ópticas. Obviamente, ello imponía limitaciones, sobre todo en la investigación biológica.

Sin embargo, el microscopio compuesto era un instrumento cien-

tífico de primera, y la *Micrographia* de Hooke fue el primer tratado de microscopia. Como sus objetos eran bastante burdos (insectos, semillas, piedras, tejidos, el filo de una navaja, hojas, alas, plumas, etcétera) y como no pretendía penetrar en la estructura anatómica por medio de la disección (aunque examinó el ojo compuesto del insecto y descubrió la composición celular del corcho), Hooke logró producir una serie de ilustraciones admirables a pesar de las limitaciones de su microscopio. La mayoría de los descubrimientos de la época en anatomía diminuta, asociados con los nombres de Malpighi, Swammerdam y Grew —tales como la circulación capilar de la sangre, por ejemplo— también podían demostrarse con la ayuda del instrumento compuesto. Para las observaciones más detalladas, sin embargo, se requería otra técnica cuyo exponente más destacado fue el microscopista holandés Antoni van Leeuwenhoek. El microscopio compuesto había sido un estímulo para la fabricación de lentes biconvexas muy pequeñas, de distancia focal corta, que se usaban como objetivos. Se descubrió que con estas lentes de gran potencia, o incluso con diminutas esferas de cristal fundido, utilizadas como microscopios sencillos se obtenían resultados mejores que utilizándolas como elementos de un sistema óptico que multiplicaba las aberraciones. Si se quería obtener un aumento considerable, el diámetro de las lentes tenía que ser inferior a 2,5 milímetros; las lentes resultaban proporcionalmente difíciles de esmerilar y manipular, además de fatigar mucho la vista. Pero en sus cartas a la Royal Society Leeuwenhoek dio cuenta de observaciones obtenidas por este medio que no se repitieron hasta contar con los microscopios acromáticos del siglo XIX. Otra prueba de su pericia como óptico es que una de las pocas lentes suyas que se conservan fue sometida recientemente a una serie de pruebas que demostraron que era muy superior a cualquier otra de las lentes sencillas que se conocen; otras lentes fabricadas por él son buenas pero no sobresalen. Esta pericia le permitió estudiar más minuciosamente que los demás observadores los espermatozoos y los corpúsculos rojos de la sangre y ser el primero en discernir los protozoos y las bacterias. A pesar de la incredulidad de algunos de sus contemporáneos, nacida del gran número y de la disparidad de los descubrimientos de Leeuwenhoek, así como de la dificultad de confirmarlos, su trabajo era de una precisión asombrosa. A finales de siglo Leeuwenhoek era el único que investigaba seres microscópicos, aunque otros estaban estudiando las partes mi-

croscópicas de seres más grandes; a causa de ello, los resultados que obtenía eran aún en gran parte curiosidades aisladas. En el siglo XVIII la descripción de varios animales, visibles a simple vista pero cuyo estudio sólo era posible con la ayuda del microscopio, se adoptó tanto en Inglaterra (Baker, Ellis) como en Francia (Réaumur, Bonnet, Lyonet). Trembley, cuya monografía sobre la hidra se ha convertido en un clásico, trabajaba en Holanda y estaba estrechamente relacionado con los naturalistas ingleses y franceses. Todos ellos empleaban el microscopio sencillo, pero con una amplificación muy inferior a la que solía utilizar Leeuwenhoek. Así, pues, este instrumento se hizo de uso corriente entre zoólogos y botánicos, para fines que venían a ser los mismos que los de ahora, cuando aún tenía poco valor científico el microscopio compuesto, cuya potencia era mayor y al que los instrumentistas ingleses daban una bella construcción mecánica. La continuación de las ciencias de la histología y de la citología, iniciada por Malpighi y Leeuwenhoek, dependía del perfeccionamiento de las lentes, que fue rápido a principios del siglo XIX.

Sería fácil dar ejemplos comparables de cómo se hizo posible efectuar observaciones o mediciones de orden distinto, en una etapa de mayor pericia en las técnicas instrumentales, tras el largo intervalo que seguía a una invención inicial en el siglo XVII. El telescopio reflector de Newton, muy ampliado, así como perfeccionado por Herschel, permitió por primera vez al astrónomo escapar de los confines del sistema solar. Si la «revolución química» del siglo XVIII se haría sin modificar a fondo los aparatos, la cronología de la ciencia eléctrica, en cambio, la fijó el descubrimiento de instrumentos para la creación y medición de cargas y corrientes. También durante el siglo XVIII se publicaron numerosas obras que hablaban de la fabricación y uso de instrumentos científicos de todo tipo y que enseñaban técnicas de experimentación y observación; al mismo tiempo, los fabricantes se esforzaban inteligentemente por mejorar sus instrumentos. John Dollond, el hombre práctico que resolvió el problema de la fabricación de objetivos telescópicos acromáticos, problema que desconcertaba a los matemáticos, era fabricante de instrumentos. El cronómetro marítimo, perfeccionado en gran parte por otro hombre práctico, John Harrison, impuso la colaboración estrecha entre relojeros y astrónomos. La ciencia, por tanto, se encontró en una situación prometedora a principios del siglo XIX, ya que podía recabar

los servicios de un oficio especializado, hábil y progresista, y se daba cuenta más que nunca de que dependía de su equipo material. En casi todos sus aspectos, el avance de la ciencia iría aparejado al de algún instrumento o al de diversas técnicas de laboratorio.

CAPÍTULO 10

EL PROGRESO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Los filósofos han subrayado con frecuencia la distinción que existe en la ciencia entre el descubrimiento y la demostración: la reflexión y la investigación superficial de un problema pueden llevarnos a la solución del mismo sin sugerir una demostración convincente de que es correcta, la cual habrá que obtener de alguna otra manera. En cambio, puede suceder que el descubrimiento y la demostración sean idénticos. En el caso de un descubrimiento más bien elemental como el que hizo el joven Isaac Newton (y en el cual se le había anticipado Marcus Marci) de que los rayos de luz azules son más refractados —en un prisma, por ejemplo— que los rayos rojos suele suceder así: porque la demostración del efecto es sencillamente la repetición del experimento original, que puede variarse infinitamente para demostrar su validez en todos los casos. O, para demostrar que el oxígeno soporta la combustión mejor que el aire normal. se repite alguna variante del experimento de Priestley que condujo al descubrimiento de este hecho. La verdadera dificultad radica en demostrar una explicación o teoría. Así, pues, volviendo al color y a la refracción, el convencimiento de Newton de que la refrangibilidad es una propiedad inherente al rayo y de que, en consecuencia, los rayos son etiquetados característicamente, por así decirlo, por una proporcionalidad definida además de por sus colores individuales, es mucho más difícil de demostrar que la propiedad original que pretende explicar. Porque no es racionalmente necesario que los rayos sean etiquetados de esta manera, ni que cada uno de ellos exista como componente independiente, elemental e invariable de la luz blanca normal, como arguyó Newton. Así lo reconoció él desde el

principio: cabe imaginar teorías de la naturaleza física de la luz en las cuales esta propiedad no se da, del mismo modo que es posible imaginar otras teorías en las cuales sí existe tal propiedad. Por consiguiente, la veracidad de la propiedad que Newton infirió de su experimento original con el prisma (pp. 400-401) tiene que ser contingente y debe ser demostrada por distintos experimentos relativos al color y a la refracción. En su primer trabajo sobre óptica, en el que defendía el carácter heterogéneo de la luz blanca, Newton no aportó ninguna prueba en tal sentido resultante de nuevos experimentos y, a causa de ello, ciertos críticos pusieron en duda la necesidad de la inferencia defendida por Newton.

Éste es un ejemplo de las dificultades que pueden surgir cuando se intenta confirmar teorías por medio de experimentos: cuanto más precisa sea la confirmación que se busca, mayor es el número de dificultades que surgen. Al argumentar una teoría basándose en la probabilidad inherente y el conocimiento común, cual es el caso del atomismo griego, por ejemplo, no se presenta la dificultad de la confirmación experimental. La filosofía mecanicista de Descartes era de un tipo parecido, puesto que podía ilustrarse mediante experimentos adecuados, pero no confirmarse, ya que sus cimientos eran aserciones metafísicas (un vacío es imposible en la naturaleza) y entidades invisibles (los tres tipos de materia). Las teorías con las que estén relacionados los experimentos deben tener siempre un alcance más restringido. Lo que proclama la teoría debe encajar con lo que determinan los experimentos para que la experimentación o la teorización ofrezca la máxima utilidad. Sin semejante encaje, los experimentos sólo pueden ser pruebas empíricas escogidas al azar y las teorías quedan reducidas a simples aserciones que no pueden probarse.

Esta clase de encaje apenas existió durante la primera mitad del siglo XVII, de ahí que la labor científica de dicho período no pueda calificarse típicamente de experimental, aunque, huelga decirlo, se hacían experimentos. Veamos, por ejemplo, el célebre libro de William Gilbert titulado *De magnete* (1600): sin duda hay en él muchísimos experimentos con calamitas y hierro, numerosos instrumentos ideados especialmente para los propósitos de Gilbert, muchas refutaciones objetivas de creencias erróneas tales como la posibilidad de obtener movimiento perpetuo de algún tipo de máquina magnética. Pero Gilbert era un filósofo de la naturaleza además de ser el padre de la ciencia experimental inglesa: y a medida que hace extensivo

su tratamiento al globo terráqueo y al principio universal del magnetismo deja el experimento muy atrás. En el comienzo del libro nos dice que la piedra imán esférica (configurada con los polos sobre un diámetro) teniendo «la forma orbicular que la naturaleza concedió desde el principio a la madre común Tierra [posee] muchas virtudes, por medio de las cuales muchas verdades abstrusas y olvidadas de la filosofía enterradas en lastimosas tinieblas pueden conocerlas más fácilmente los hombres». Resumiendo, el mérito supremo de esta terrella (o pequeña Tierra, como la llama él), muy empleada en las investigaciones de Gilbert, radicaba en que le servía como modelo de laboratorio del Gran Imán, la Tierra. Aunque investigó la variación de la declinación magnética a partir del norte verdadero, así como la inclinación, por lo demás llevó a cabo pocos experimentos de geomagnetismo (de hecho, esta disciplina empezó a estudiarse en el siglo XIX) y la dependencia de su terrella como modelo resultó engañosa en ciertos aspectos. Así, pues, la filosofía magnética de Gilbert no se fundamentaba en experimentos masivos, sino en una analogía y la confianza que ésta le inspiraba le lleva a alturas de animismo casi copernicano al explorar la idea de un universo magnéticamente orgánico:

> Una piedra imán es una cosa maravillosa en muchísimos experimentos, y se parece a un ser viviente. Y una de sus virtudes remarcables es aquella [que causa rotación] que los antiguos consideraban como un alma viviente en el cielo ... Porque sospechaban que tales movimientos varios no podían surgir sin una naturaleza divina y animada ... Nosotros, sin embargo, encontramos esta vida en globos solamente y en sus partes homogéneas ... Nosotros consideramos que todo el universo es animado, y que todos los globos, todas las estrellas, y también la noble Tierra han sido gobernados desde el principio por sus propias almas designadas y tienen los motivos de la autoconservación.[1]

Evidentemente, lo que comenzó como un estudio objetivo de las propiedades de atracción y repulsión de la materia ha terminado como una metafísica muy diferente; la experimentación, que en apariencia es una garantía de realismo y defensa contra la especulación desca-

1. William Gilbert (trad. de S. P. Thompson), *On the magnet*, reed. Dover, Nueva York, 1958, pp. 12-13, 208.

bellada, ha resultado no ser tal cosa (cuando menos en el caso de Gilbert). Y por esto, al parecer, Bacon le echó la culpa, pues no apreciaba como nosotros la fuerza de la imaginación de Gilbert.

En otros casos del mismo período inicial, la experimentación inspiraba tan poca confianza que se la ocultaba deliberadamente. De los tres descubridores de la ley de Snel (p. 297) conocemos —y sólo desde hace muy poco— el proceso empírico de uno solo, Harriot. Las pruebas o experimentos extraviados atribuidos a otros por sus contemporáneos son muchísimos. El caso supremo es el de Galileo: ahora sabemos (capítulo 4) que llevó a cabo extensas series de experimentos sobre la caída de cuerpos y sobre los proyectiles, pero optó por no citarlos como prueba, sino suprimirlos o, cuando menos, citarlos sólo muy superficialmente en las alusiones más breves y generales. Galileo tampoco reclamó específicamente como suyas las pruebas efectuadas en la torre inclinada de Pisa y vinculadas inmortalmente a su nombre; quien lo hace es su biógrafo Viviani. Galileo prefirió justificar racionalmente en sus libros lo que había descubierto por medio de experimentos.

Tal vez obró con acierto al no poner en peligro su reputación, en una época en que un hombre podía verse acusado de mentiroso si sus informes se salían de las creencias comunes. Porque era precisamente esto lo que había ocurrido al publicar Galileo el *Sidereus nuncius* en 1610; por haber visto a través del telescopio lo que nunca antes se había observado en los cielos, los satélites de Júpiter, miríadas de estrellas nuevas en la Vía Láctea, Galileo se vio acusado de dejarse engañar por el instrumento y la acusación la hicieron astrónomos teóricos como Antonio Magini de Bolonia que nunca habían mirado a través de un telescopio. Los nuevos fenómenos no se aceptaron como reales hasta después de que Galileo los mostrara en 1611 a los astrónomos de Roma, jesuitas, a través de su propio telescopio. No deberíamos censurar del todo el escepticismo de los críticos, si bien su forma de expresarlo fue deplorable, ya que los libros de la época estaban llenos de maravillas para que se las creyera quien así lo desease. Por no hablar de las matemáticas, donde la valoración de π seguía siendo un deporte corriente (el gran erudito Julio César Escalígero «probó» que era igual a $\sqrt{10}$), o, en el otro extremo, los extraños cuentos de brujería y posesión, existía una larga tradición de maravillas ópticas. ¿Qué debemos pensar de la afirmación del

respetable matemático e ingeniero inglés Thomas Digges en el sentido de que, por medio de lentes y espejos, al parecer,

> podéis no sólo exponer la proporción de toda una región, sí, representar ante vuestros ojos la viva imagen de cada ciudad, pueblo, etcétera ... sino también ... mediante la aplicación de cristales en debida proporción hacer que cada casa o habitación de ellos [se] dilaten y muestren de forma tan amplia como apareció primero toda la ciudad ... o leer cualquier carta que allí esté abierta ...

¿Acaso su padre, el inventor Leonard Digges, había ideado antes de 1571 un telescopio con lente de *zoom*?[2] Esta descripción de un artificio experimental —uno de varios—, ¿debería haberse aceptado como creíble o relegado a la misma clase que otros cuentos de maravillas ópticas? Además existían las numerosas y en apariencia plausibles historias de los alquimistas. La mayoría de los autores de libros de alquimia afirmaban en un sitio u otro, no necesariamente que ellos hubieran hecho oro, o siquiera que hubiesen presenciado cómo lo hacían, pero sí, cuando menos, que habían examinado especímenes de oro facticio, de cuyos orígenes alquímicos no podían tener duda alguna. Entre ellos, aunque más médico que alquimista, estaba Johann Baptist Van Helmont (1577/80-1648), hombre muy admirado y leído en su tiempo y que sigue siendo objeto de considerable interés; Van Helmont nos dice que en varias ocasiones ha visto y tocado la piedra filosofal:

> ... era de un color como el del azafrán en polvo, pero pesado, y reluciente como el vidrio en polvo; una vez me dieron la cuarta parte de un grano ... enrollada en papel, [la] proyecté sobre ocho onzas de azogue calentadas en un crisol; e inmediatamente todo el azogue, con cierto ruido, dejó de fluir, y, coagulándose, formó como un terrón amarillo: pero después de verterlo, con los fuelles soplando, se encontraron ocho onzas y algo menos de once granos del más puro oro.

¿Fue el propio Van Helmont engañado, o trataba de engañar a sus lectores? Porque creyera él lo que creyera —y relató este cuento en

2. F. R. Johnson, *Astronomical thought in Renaissance England*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1937, pp. 175-178 citando a T. Digges, *Pantometria*, 1571.

más de una ocasión—, el experimento nunca tuvo lugar como él lo describió. Pero Van Helmont era crédulo: como demuestra la anécdota que contaba sobre la torre de una iglesia cerca de Leiden, en Holanda, que fue totalmente destruida por los truenos (!), hasta tal punto que no quedó nada de ella; cuando dos semanas después se cavó una sepultura, «he aquí que debajo de un césped firme y verde apareció primero la veleta de latón con la cruz de hierro y luego un pináculo de la torre, y a la larga se extrajo la torre entera».[3] En modo alguno puede afirmarse que a principios del siglo XVII los libros sobre la naturaleza consistieran meramente en un aristotelismo racional y árido; por el contrario, abundaban en ellos las historias sobre lo que habían visto y hecho los hombres, historias que se relataban con la autoridad más confiada y que con no poca frecuencia terminaban con esta admonición: Probadlo vosotros mismos y veréis que es verdad.

No basta con la simple relación de un experimento. Hacen falta testigos oculares dignos de crédito, pruebas circunstanciales, contexto, medición cuantitativa. Sobre todo, la ciencia experimental organizada, si no se quiere que sea tan confusa como aquel animal de Van Helmont cuyos padres eran un lirón y un conejo, necesita de un grupo de hombres (como, por ejemplo, la Accademia del Cimento y la Royal Society) que se dediquen a verificar experimentos. Sin embargo, las características diferentes de estas dos corporaciones ponen de relieve un detalle importante. Las comprobaciones esporádicas, encaminadas a ver si tal o cual autor ha contado la verdad, difícilmente conducirán a la ciencia organizada; lo más provechoso es cuando la relación entre experimento y teoría puede explorarse. En esto cabe encontrar la explicación de por qué la ciencia química y la tecnología química se limitaron a hacer una aportación ambigua, que maduró gradualmente, al desarrollo de la experimentación. Por un lado, crónicas literarias bastante racionales y reproducibles de los oficios químicos y metalúrgicos —la manufacturación de latón o de pólvora, por ejemplo—, como en el caso de la *Pirotechnia* (1540) de Biringuccio, y también crónicas de análisis y pruebas químicas exactamente cualitativas, como las que se encuentran en el *Tratado de*

3. J. B. Van Helmont (trad. de John Chandler) *Oriatrike o Physic refined*, Londres, 1662, pp. 752-753, p. 91.

menas y ensayos (1574) de Lazarus Ercker.[4] Los artesanos que ejercían estos oficios controlaban muchas de las técnicas y los materiales necesarios para una ciencia experimental exacta, por ejemplo, el uso de la balanza. Por otro lado, la mayoría de los escritos sobre química, muchísimo más abundantes y transformándose gradualmente en farmacia y alquimia, eran difíciles de encontrar y confusos. Iban dirigidos a adeptos y místicos más que a científicos de laboratorio. Y, sobre todo, no existía ninguna teoría general de la constitución de la materia o del cambio químico. Era posible, desde luego, comprobar las instrucciones de los ensayadores sobre cómo separar la plata y el oro con ácido nítrico; también podían comprobarse, quizá con más dificultad, ciertos informes de Paracelso, de Oswald Croll o de Von Helmont. Pero, ¿cómo comprobar si la piedra de Butler cura realmente todas las enfermedades? Y en muchos de estos ejemplos específicos, ¿qué se comprobaría además de la credibilidad del autor? Tanto es así que, si bien el historiador puede señalar un momento en el tiempo en el que las influencias de Paracelso o de Helmont dejaron de ser significativas, no puede decir cuándo fueron refutadas efectivamente ni quién lo hizo.

El primer ejemplo, que tal vez sea también el mejor, de ciencia experimental organizada en el siglo XVII nos lo brinda la neumática. No es que fuera totalmente nueva, ya que los griegos conocían diversos artificios neumáticos, incluyendo la jeringa y la bomba impelente (pero no la bomba de succión) y habían debatido la difícil cuestión de los espacios vacíos en la naturaleza. Sus ideas, expresadas principalmente por Herón de Alejandría, se hicieron familiares en el siglo XVI. El asunto adquirió un nuevo aspecto al descubrirse que la resistencia mecánica de la naturaleza a la formación de un vacío —la resistencia que se siente al retirar un pistón bien ajustado de un cilindro cerrado— era limitada: ni siquiera la bomba de succión más perfecta conseguía que el agua de un pozo subiese a más de unos 9 metros. Galileo, el primero en poner su observación en letra impresa (en sus *Consideraciones y demostraciones*, 1638) comparó de un modo bastante curioso la columna de agua en tubo y barril con un hilo que se rompe bajo su propio peso si es suficientemente

4. Ambas obras han sido bien editadas en traducción inglesa por Cyril Stanley Smith.

largo.[5] Un matemático de Roma, Gasparo Berti (muerto en 1643), del que poco se sabe, repitió la situación en un largo tubo de plomo instalado verticalmente; después de llenarlo desde arriba y de cerrar herméticamente el extremo superior, se quitó el tapón del extremo inferior y el nivel del agua en el tubo descendió hasta la altura indicada por Galileo. En realidad no está claro si Berti y sus amigos juzgaron que el espacio que el agua dejó vacante al descender era un vacío, o si se dieron cuenta de que la columna de agua era presionada hacia arriba desde el fondo y no suspendida desde arriba. Lo que hicieron con la parte inferior se convertirá en un ejemplo clásico: sumergir el tubo en un cubo de agua, e induce a pensar que creyeron lo segundo. Cuando Evangelista Torricelli se enteró en Florencia del experimento de Berti se apresuró a repetirlo con mercurio, arguyendo que como este metal es unas catorce veces tan denso como el agua, la columna debía tener una altura de algo más de 0,50 metros: y así fue. Lo importante era la proporción peso/área de superficie en la base de la columna, esto es, la presión: basándose en ello, Torricelli conjeturó que la columna era sostenida por el peso compensador de la atmósfera, conjetura que encontraba apoyo en su observación de que la altura barométrica (como podemos denominarla) no era constante, sino que variaba de un día a otro. Lo que refrenaba al émbolo de una jeringa no era la resistencia de la naturaleza al vacío, sino sencillamente el peso de la atmósfera.

En 1644 este experimento que Torricelli hizo el año anterior llegó a conocimiento de Marsenne, que estaba en París y lo propagó por toda Europa, eclipsando las pruebas independientes realizadas en otras partes. Muchos ansiaban repetirlo; era casi tan apasionante como las maravillosas observaciones que hiciera Galileo con el telescopio. Uno de los que lo repitieron fue Blaise Pascal (1623-1662), prodigio matemático que a la edad de dieciséis años escribió un tratado sobre las secciones cónicas, y a los diecinueve construyó la primera máquina de calcular aritmética. También él realizó, en Rouen, el correspondiente experimento con el tubo de agua. Demostró, inclinándola, que lo importante era la altura vertical y no la longitud del tubo e ideó otras muchas variaciones. Al cabo de cerca de un año, cuando le dijeron que algunos suponían que el peso de la atmósfera

5. Yo, al menos, nunca he entendido cómo Galileo pudo atribuir fuerza de tensión a un fluido: ¿la confundiría con la viscosidad, como, por ejemplo, el caso de la miel?

aguantaba la columna de fluido —dado que filosóficamente se consideraba que el aire era una sustancia material, de hecho, uno de los cuatro elementos, la atribución de peso al mismo no era ninguna innovación— dedujo que si se creía que la capa de aire que rodeaba la Tierra era bastante tenue, en las montañas altas la altura de la columna del barómetro sería menor porque una parte del peso de la atmósfera estaría debajo del aparato. Vio también que la atmósfera es, por así decirlo, un océano de aire comprimido en el cual los hombres se mueven y respiran como peces en el océano de agua; en rigor, al barómetro no lo sostiene el *peso* del aire, pues retiene su altura al ser colocado en un recipiente perfectamente cerrado a la presión atmosférica, sino que más bien lo sostiene la presión del aire, que debe ser elástica o parecida a un muelle. Esto se podía demostrar limpiamente por medio de una estratagema bastante complicada que consistía en ajustar la base de un barómetro dentro del espacio «vacío» que hay en la parte superior de otro barómetro: la altura del primero variaba entonces a la inversa de la altura del mercurio del segundo. Pero mucho más espectacular que los experimentos de Rouen fue el encargo que hizo Pascal a su cuñado, Périer, que vivía cerca de Puy de Dôme, de 1.460 metros de altura, en la Auvernia; el 19 de septiembre de 1648 Périer y un grupo de observadores midieron la altura del barómetro en la ciudad de Clermont Ferrand: 67 centímetros; luego ascendieron a la cima de la montaña y midieron varias veces la altura del barómetro: el resultado fue siempre 59 centímetros, mientras que a media bajada mostraba un valor intermedio de sólo 64 centímetros. Repetidas pruebas permitieron a Périer calcular que, mientras que a nivel del suelo el cambio de presión era de alrededor de 0,13 centímetros de mercurio por cada 15 metros de diferencia de altitud, a unos 900 metros por encima de la ciudad se producía la misma alteración en el mercurio por aproximadamente cada 30 metros de diferencia de altitud. Esta demostración —pues como tal fue interpretada— de que la resistencia de la naturaleza al vacío no era ningún efecto mágico u orgánico, sino sencillamente la consecuencia mecánica de la presión atmosférica, pareció en su día tan trascendental como la confirmación de la teoría de la relatividad de Einstein por parte de los astrónomos.

Mientras tanto, Otto von Guericke realizaba un tipo de experimento neumático totalmente distinto. Von Guericke, cuyo interés por el aire y el vacío tenía su origen en la cosmología, era un hom-

bre de formación universitaria que ejercía de ingeniero y también de diplomático y que, además, era un copernicano convencido: se preguntó a sí mismo qué llenaba el espacio en un universo copernicano y cómo se movían los cuerpos celestes en él. A partir de 1646, momento en que adquirió por vez primera una idea de la física cartesiana con su defensa de la plenitud del espacio, y también del experimento barométrico de Torricelli, decidió someter la afirmación de Descartes a una prueba más eficaz. Al año siguiente intentó en vano extraer toda el agua que había en un barril hermético: oyó cómo el aire se infiltraba. Su primera vasija de cobre se rompió hacia dentro. Finalmente, utilizando una esfera, logró sus propósitos; para entonces ya había comprobado, utilizando una bomba sencilla tipo jeringa con dos válvulas, que el aire mismo podía agotarse. Sus experimentos probaron la elasticidad del aire dentro de la vasija y la enorme fuerza que ejerce la atmósfera sobre una superficie grande cuando el aire situado detrás de ella era reducido a una presión inferior por la bomba. En el famoso experimento de «Magdeburg» unos tiros de caballos no lograron separar dos voluminosos hemisferios de metal unidos así el uno al otro después de que el aire que contenían quedase muy enrarecido.

Von Guericke era un experimentador consciente que citaba a San Basilio, a Galileo y a Athanasius Kircher (pero no a Bacon) en defensa de la experimentación, pero decidió aplazar hasta 1672 la publicación de su propia crónica de las demostraciones efectuadas ante cierto número de grandes del reino. En dicho año las encastró en una extensa obra sobre cosmología y física especulativa, en la cual (por ejemplo) arguye que el espacio vacío por purga precedió a la Creación por ser el receptáculo de la misma.[6] Las primeras noticias impresas de su labor aparecieron en *Mechanica hydraulica pneumatica* (1657) y *Technica curiosa* (1664) de Caspar Schott. El primer libro, que tuvo gran difusión, cayó en las ansiosas manos de Robert Boyle, que a la sazón vivía en Oxford, donde era miembro del círculo de Wilkins. Inspiró en él la decisión de explorar personalmente las propiedades del vacío de manera más minuciosa.

Robert Boyle (1627-1691), el hijo menor de una familia noble

6. Las ilustraciones de *Experimenta nova (ut vacantur) Magdeburgica de vacuo spatio* (Amsterdam, 1672) se han reproducido más a menudo de lo que se ha leído el texto. Este libro debía ser raro en Inglaterra, pero Oldenburg lo reseñó en dos páginas en *Phil. Trans.*, n.° 88 (18 de noviembre de 1672).

e intelectual, había sido introducido por su hermana, lady Ranelagh, en los círculos intelectuales del Londres de la Commonwealth; Robert no tardó en intimar con Samuel Hartlib (p. 325), que durante un tiempo fue su mentor y luego siguió siendo amigo suyo, pero el interés de Boyle se decantó siempre principalmente por la filosofía natural, y la utilidad de la misma, más que por la organización, la educación y otros medios de trabajar por el bien público. Boyle se zambulló en la química con Benjamin Worsley, Gerard Boate, Robert Childe y George Starkey, el «filósofo por el fuego» helmontiano. Algunos de estos hombres hablaban de formar un club de químicos. A principios del decenio de 1650 Boyle estaba adquiriendo experiencia técnica en el uso de hornos y aparatos; leía mucho y también empezaba a escribir copiosamente, aunque no le publicaban nada todavía. En 1654 se instaló en Oxford, tras conocer a Wilkins el verano anterior, y, gracias a su inteligencia y a su rango, pasó a ser el miembro más destacado del grupo que allí había. Con el ingreso en dicho grupo, su gama de intereses se hizo aún más amplia. Boyle siempre pudo emplear a ayudantes científicos y secretarios: el hombre que inventó la provechosa bomba de aire para Boyle fue Robert Hooke, que en 1653, cuando era un estudiante pobre, había llegado a Oxford, donde el anatomista Thomas Willis le había recomendado a Boyle. Si la bomba de Boyle era un instrumento de laboratorio, ello se debía a que podía manejarla un solo hombre (mediante un engranaje de piñón y cremallera), a que tenía válvulas como es debido y a que el espacio evacuado era un globo de vidrio. Esta vasija incluso tenía un artificio que permitía que, una vez creado el vacío, en su interior pudieran hacerse movimientos sencillos. La fabricación de bombas parecidas en esencia a la de Boyle siguió hasta bien entrado el siglo XIX; al principio, cuando era nueva y original, venía a ser el ciclotrón de su época.

Boyle y Hooke investigaron detenidamente todos los fenómenos habituales de la neumática que se conocían entonces, para ilustrar «la elasticidad y el peso del aire»; estas propiedades se describen en el libro de Boyle que lleva ese título y fue publicado en 1660.[7] Por ejemplo, el efecto de reducir o incrementar la presión externa sobre el depósito de mercurio del barómetro resultaba evidente si se agitaba

7. Robert Boyle, *New experiments physico-mechanical on the spring of the air and its effects*, Oxford, 1660.

vigorosamente la bomba (en este caso la vasija de vidrio estaba perforada para que el tubo del barómetro pudiera introducirse en ella y cerrarse herméticamente). Esta parte de la investigación fue la que dio el resultado más conocido: la ley de Boyle. Curiosamente, si bien reconocía que debía existir una relación matemática entre un volumen de gas cerrado y la presión que ejerce éste, Boyle no lo dijo hasta que (como él mismo reconoció) fue resuelta independientemente por Hooker y Richard Towneley. Boyle enunció por primera vez su ley en su «Defense of the doctrine touching the Spring and Weight of the Air», donde la demostró de manera magistral, en la segunda serie de experimentos con la bomba de aire que se publicó. Muchos años después aparecería una tercera serie.

Desde el punto de vista cualitativo, la parte más interesante de la labor que realizó Boyle en el laboratorio fueron los experimentos sobre las propiedades de las cosas *in vacuo*. El magnetismo y la luz no resultaban afectados; el sonido cesaba. Los pájaros y otros animales morían con tanta rapidez como pudiera manejarse la bomba. La llama se extinguía (pero la pólvora podía seguir disparándose). El agua caliente hervía furiosamente. Iba haciéndose obvio que el aire distaba mucho de ser una sustancia inerte como a veces lo habían presentado los filósofos, e incluso empezaba a aparecer un indicio de que tenía importancia química. Asimismo, en sus últimos experimentos con la bomba de aire Boyle demostró que las sustancias pueden desprender *in vacuo* un aire normalmente imperceptible, un aire que, por así decirlo, estaba escondido o fijo en su sustancia; era una sugerencia cargada de presagios.

El «vacío boyleiano» pasó a ser uno de los grandes lugares comunes de la ciencia, tanto en la época de Boyle como en la siguiente y sería inmortalizado por Joseph Wright de Derby en su cuadro «El filósofo». Todo el mundo deseaba como mínimo haber presenciado los experimentos, aunque en realidad eran pocos los que podían comprarse un aparato tan costoso. Boyle regaló su primera bomba a la Royal Society. Pero muchísima gente podía comprarse un barómetro y seguir sus irregulares subidas y bajadas, que pronto aprendieron a relacionar con los cambios de tiempo. De esto surgieron dos de las observaciones más extrañas de la neumática del siglo XVII: la primera la señaló Christiaan Huygens y despertó gran interés en el decenio de 1660. La «suspensión anómala del mercurio» es un efecto de la tensión superficial: en condiciones excepcionales el mercurio

permanecerá en un tubo largo, a una altura de unos 1,50 metros, en lugar de formar un barómetro del modo acostumbrado. ¿Era esto prueba de la existencia de un éter cartesiano, ya que la presión de la atmósfera por sí sola no podía explicar el efecto? De mayor interés fue la observación de la triboluminiscencia o resplandor eléctrico en el barómetro. El primero en percibirla fue el astrónomo Picard alrededor de 1676; cuando trasladaba su barómetro a otro aposento la inevitable oscilación del mercurio producía un ligero resplandor en el espacio vacío que había encima de la columna.[8] El efecto era tan difícil de verificar como de explicar —el matemático Johann Bernoulli intentó relacionarlo también con el éter cartesiano—, pero a principios del siglo siguiente sugirió otro experimento al conferenciante científico londinense Francis Hauksbee. Instaló un globo de vidrio seco y evacuado como generador triboeléctrico, utilizando la mano como frotador (según la idea de Von Guericke, que para este fin había empleado una bola sólida de azufre fundido); al acumularse una carga de electricidad, observó un resplandor en la esfera hueca. Así, pues, la luz y la electricidad estaban muy vinculadas, lo cual despertó mucho interés en Newton, pues anteriormente lo único que se sabía era que la fricción eléctrica causaba atracción y repulsión.[9] El experimento de Hauksbee fue el principio de un inmenso campo de pensamiento y experimentación durante los siglos subsiguientes.

Es bastante raro que un solo investigador produjera un conjunto tan rico y completo de resultados como los que se obtuvieron en las diversas series de experimentos con la bomba de aire que hicieron Boyle y sus colaboradores, entre los cuales, después de Hooke, se encontraba Denys Papin (1647-1712) el abuelo de la máquina de vapor. Cabría añadir que la máquina de vapor atmosférico de Newcomen (1712) era también una peculiar bomba de aire que utilizaba la vasta fuerza elevadora de la presión atmosférica que Von Guericke demostrara por primera vez. Contrariamente a las bromas de Carlos II, el pesaje del aire por los filósofos acabó produciendo —por

8. *Histoire de l'Academie Royale des Sciences*, II, 1686-1699, París, 1733, pp. 202-203. Publicada por vez primera en el *Journal des Scavans*, de donde se reprodujo (en inglés) en *Phil. Trans.*, n.º 136 (25 de junio de 1677).

9. Probablemente, la atmósfera húmeda de las casas del siglo XVII y la composición orgánica de los materiales utilizados dentro de ellas impedían que apareciesen normalmente destellos, descargas y acumulaciones de carga sobre la persona, que tan familiares son en nuestra vida doméstica.

mediación del buen sentido mecánico de Thomas Newcomen— resultados importantes para la industria.

La neumática era una ciencia totalmente nueva; la óptica experimental tenía una respetable tradición que se remontaba a los griegos. Uno de sus aspectos, relacionado con la fabricación de lentes para instrumentos, lo comentaremos en un capítulo posterior; otro, que estudiaremos ahora mismo, el estudio de la refracción de la luz, fue iniciado eficazmente por Alhazen en el siglo x, continuado por Teodorico de Freiburg y sus predecesores durante los siglos XIII y XIV y reavivado por Giambaptista Porta y otros en el siglo XVI. Teodorico había mostrado de qué manera una garrafa de vidrio llena de agua podía servir como modelo para producir el arco iris; aunque su labor haya caído en el olvido, la tradición experimental práctica ciertamente prosiguió, de hecho, reforzada por la utilidad práctica de la lente para anteojos a partir de la época de Teodorico.

Sin embargo, la óptica también era, en un sentido aún más importante, una ciencia matemática: la supuesta trayectoria de un solo rayo de luz (hipotético) en línea recta era lo que la hacía matemática. A partir de la época de Ptolomeo unas tablas arbitrarias —fundadas supuestamente, pero no de hecho, en mediciones reales— correlacionaban el ángulo de aparición desde la zona interfacial con el ángulo de incidencia sobre ella. Los astrónomos sabían muy bien que los rayos de las estrellas son refractados a través de la atmósfera también, pero ignoraban exactamente en qué proporciones. Como hemos visto, la ley general de la refracción —la ley de Snel— debió de obtenerse de mediciones; Descartes, que la poesía, y antes que él Kepler, que no la tenía, iniciaron la teoría matemática de las refracciones que Barrow y Newton ampliarían. Mientras tanto, el problema físico del origen de los colores en el arco iris y otros espectros, o, para el caso, el problema de la naturaleza del color en general, no habían hecho ningún progreso. En términos cualitativos se suponía desde los griegos que el color era una función de la intensidad: todos los colores apagados parecen menos subidos y el extremo azul del espectro se transforma gradualmente en oscuridad. A pesar de los reparos inmediatos y urgentes con que chocó este punto de vista, seguía siendo el mejor que podía ofrecer el siglo XVII en sus comienzos: implicaba, obviamente, que cualquier luz de color resultaba débil o modificada de un modo u otro en comparación con la luz blanca. Descartes concretó la segunda hipótesis. Definiendo la luz

como una presión (o un movimiento) de las partículas de su éter, formuló además la hipótesis de que en la luz blanca las partículas no tienen giro, mientras que los colores son nuestras diversas respuestas a grados variables de giro en las partículas. El giro se adquiría mediante el paso oblicuo (refracción) de los rayos a través de una zona interfacial, acontecimiento que sólo concuerda con el movimiento o traslación lineal de las partículas de éter.

En *Micrographia* (1665), libro que trata de su microscopio y de las observaciones efectuadas con él, la mayoría o todas ellas en Oxford, Robert Hooke dedicó unas cuantas páginas a la luz y a los colores. Rechazando la hipótesis cartesiana de la propagación de partículas, Hooke arguyó que un rayo de luz consistía más bien en una sucesión de pulsaciones propagadas a través del éter desde la fuente. Cada pulsación o vibración en la llama o en otra fuente de luz blanca formaría una esfera concéntrica en expansión a su alrededor «justo de la misma manera (aunque infinitamente más rápida)

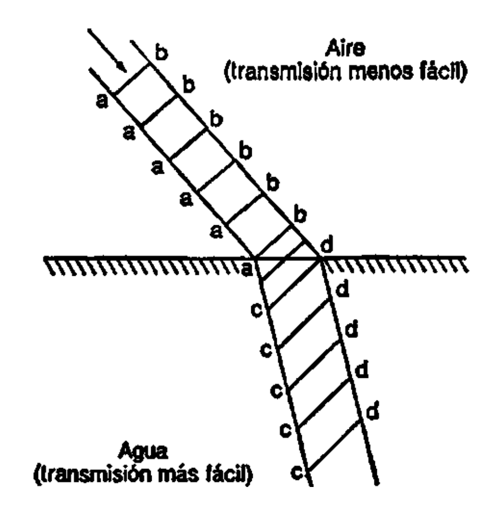


Figura 10.1

Teoría de la refracción de Hooke

aaabbb, rayo incidente; *cccddd*, rayo refractado. *ab*, *ab* pulsaciones perpendiculares, *cd*, *cd* pulsaciones oblicuas.

que las olas o anillos en la superficie del agua forman círculos cada vez mayores alrededor de un punto donde se inició el movimiento al arrojar una piedra». Cuando la expansión de las esferas era obstruida de tal forma que sólo permitía el paso de un rayo de luz, las sucesivas pulsaciones o vibraciones formarían un ángulo recto con el rayo. Al considerar el paso del rayo a través de una zona interfacial entre dos medios transparentes y formular la hipótesis (como Descartes) de que la diferencia óptica entre ellos radicaba en que uno permitía que las pulsaciones de luz viajaran más rápidamente que el otro, Hooke razonó que si el rayo caía oblicuamente sobre la zona interfacial, un extremo de cada pulsación, al atravesarla, se vería acelerado o retardado en comparación con el otro extremo, pasando más tarde a través de la zona interfacial. Por consiguiente, la pulsación se volvería oblicua en relación con el rayo y, a juicio de Hooke, en esta diferencia física entre el rayo refractado y el no refractado residían los colores del primero y la blancura del segundo. Hooke razonó que en un rayo de luz entero habría cierta confusión de las pulsaciones oblicuas y que un «borde» de cada pulsación resultaría debilitado o embotado al tener que iniciar la vibración en un medio en reposo, así: «El azul es una impresión en la Retina de una pulsación oblicua y confusa de luz cuya parte más débil precede, y cuya más fuerte sigue. El rojo es una impresión en la Retina de una pulsa-

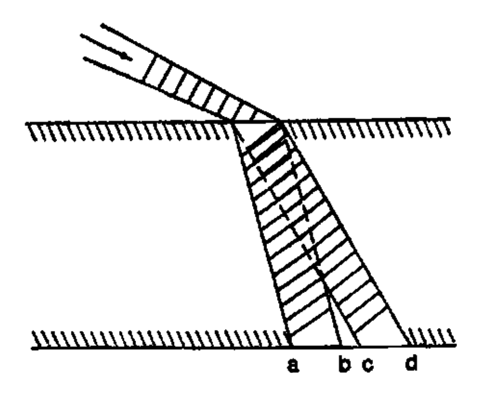


FIGURA 10.2

Teoría de los colores de Hooke

ción oblicua y confusa de luz, cuya parte más fuerte precede, y cuya parte más débil sigue». Por ejemplo, en la figura 10.2, hacia *a* el borde principal de cada pulsación oblicua, al ser adyacente al medio no perturbado, se debilita, mientras que hacia *d* el borde rezagado de la pulsación se ve debilitado por la misma razón. Por tanto, el color azul se verá alrededor de *a* y el rojo alrededor de *d*. Hooke creía que los colores intermedios del espectro «nacen de la composición y las diluciones de estos dos» producidas por la confusión de los dos tipos primarios de pulsación oblicua hacia la mitad del rayo refractado. Demostró también, mediante un análisis muy ingenioso, que cuando un rayo pasa a través de un medio muy tenue se crea una sucesión parecida de pulsaciones fuertes-débiles o débiles-fuertes, según el grosor del medio, que producen colores.

En su teoría de la luz, Hooke ideó un sencillo mecanismo mediante el cual podían obtenerse colores de la luz blanca considerados como una cadena de pulsaciones uniformes y homogéneas. Con ello explicó la asociación del calor, la luz y el movimiento en una teoría cinética toscamente delineada; el hecho de que la refracción vaya siempre acompañada de coloración; el orden de los colores producido por refracción o por interferencia; y el hecho de que el espectro producido por un prisma pueda ser reconvertido en luz blanca por un segundo prisma. En cambio, los detalles no estaban concebidos muy claramente y sólo quedaba explicada una selección de hechos conocidos. Al parecer, Hooke observó que los dos lados de un rayo refractado no son paralelos, pero no dice nada al respecto (cf. figura 10.2). Es probable que no hiciera experimentos en relación con la luz de color homogénea, pues, por lo visto, no sabía que nuevas refracciones no surtían efecto alguno en tal luz; ciertamente, habría sido difícil hacer que esto fuera compatible con su teoría. La objeción más seria a la forma general de la teoría era que no explicaba la propagación rectilínea de la luz. Si un rayo de luz era una cadena de pulsaciones, ¿por qué éstas no se desparramaban por el medio circundante, como hacen las ondas sonoras? A decir verdad, durante mucho tiempo ésta fue una objeción profunda que se hacía a toda teoría de las pulsaciones u ondulatoria y Newton la había comentado minuciosamente en *Opticks* (1704).

Ni la teoría de Descartes ni la de Hooke estaban enriquecidas por datos experimentales, aunque ambas remitían a varias supuestas analogías (como la de Hooke entre las ondas de luz y las ondas de

agua) y más adelante Hooke afirmaría haber realizado cientos de experimentos sobre la refracción y el color. No describió ninguno. En apoyo del punto de vista según el cual de las mezclas de rojo y azul saldrían todos los colores, citó un experimento con dos cajas de cristal en forma de cuña, colocadas de modo que la luz atravesara varios grosores distintos de cada una y llenas de agua teñida de azul una y agua teñida de rojo la otra. Cuesta ver cómo hubiese podido producir un amarillo brillante o algún tipo de verde; de hecho, la teoría de Hooke es sólo una modificación de la antigua hipótesis de que el color era una función de la intensidad. El importante descubrimiento experimental de Hooke, que justificó el que atribuyera periodicidad al movimiento fundamental de la luz, fue el de la teoría de los «Anillos de Newton», como se les conoce injustamente. Los observó en las laminaciones de la mica y en las placas de vidrio fuertemente apretadas unas contra otras, y advirtió su relación con las series espectrales.[10] El mismo año en que se publicó la *Micrographia* apareció también un libro póstumo de un experimentador italiano, Francesco Maria Grimaldi (1613-1663), en el que se describía una tercera forma de producir colores: cuando un rayo de luz se desviaba al pasar por encima de un borde afilado. (Más adelante a esto lo llamarían *difracción*, mientras que mucho más tarde a los anillos de Newton se los conocería por el nombre de «colores de *interferencia*».) Anteriormente, Grimaldi, por cuenta de su colega el astrónomo G. B. Riccioli (1592-1671) —ambos eran jesuitas—, había llevado a cabo una serie de experimentos sobre la caída de los cuerpos desde la torre inclinada de Asinelli, en Bolonia, que confirmaron la ley del cuadrado de los tiempos de Galileo, y fueron el origen del actual sistema de nombrar «mares» y «montañas» en la Luna. Grimaldi comprendió que las bandas de difracción de sus experimentos eran muy distintas de las bandas espectrales, y que refutaban el carácter estrictamente rectilíneo del rayo de luz. Gran parte de su libro *Tesis físico-matemática sobre la luz, los colores (y) el arco iris* debate una cuestión filosófica aristotélica sobre si la luz es una sustancia o un accidente; es un libro pesado y difícil. Al igual que los experimentadores ingleses, Grimaldi pensaba que «los colores no son algo

10. Los colores de la mica se observaron con el microscopio. Hooke tiene que hacer cambios *ad hoc* en su teoría original sobre el color y las pulsaciones con el fin de explicar la relación entre el color y el grosor de la capa transparente (de mica y aire).

permanente en las cosas visibles, no por sí mismos lúcidos cuando no son iluminados; sino que son la luz misma, bajo alguna Modificación peculiar que la vista hace sensible». Grimaldi suponía que esta modificación era «una Ondulación de surcos finísimos... una especie de trémula difusión, con cierta flotación muy sutil», con lo cual (parece seguro) no se refería a nada semejante a la teoría de las pulsaciones u ondas de Hooke y Huygens.[11]

La difracción de la luz seguiría envuelta en el misterio durante otro siglo y medio; Newton no tenía una idea muy buena de los fenómenos y es probable que nunca leyera el libro de Grimaldi. Sí leyó *Experiments and considerations touching colour* (1664), de Robert Boyle; a sus notas sobre este libro las siguen inmediatamente sus primeros experimentos propios, que precedieron al examen que hace en *Micrographia*. Boyle se interesaba sobre todo por los colores de los cuerpos opacos y en particular por la relación entre color y química (fue el primero que vio la importancia de los indicadores cromáticos como el papel de tornasol que conocemos ahora). Sin embargo, también escribió la que es probablemente la descripción más clara que leyó Newton del «Cristal prismático triangular, que es el instrumento sobre cuyos efectos podemos especular con mayor comodidad la naturaleza de los colores enfáticos (y quizá la de otros también;)» y se anticipó a Newton en creer que los colores de la superficie de los cuerpos los causa de un modo u otro la textura mecánica de su superficie.

A lo largo de varios años, quizá diez, a partir de 1664, y no escribiendo finalmente sus experimentos y su teoría hasta el comienzo del decenio de 1690 (*Opticks* tendría que esperar más a ser publicada: hasta después de la muerte de Hooke en 1703), Newton llevó a cabo la mayor investigación experimental de toda la ciencia física del siglo XVII, de hecho, una de las investigaciones más grandes de todos los tiempos. Su lugar en la evolución de Newton como filósofo lo comentaremos con detalle más adelante. Ahora lo que importa es que Newton formuló criterios completamente nuevos para el método científico, tanto en lo que se refiere a la exactitud y el detalle de una investigación como a la estrecha relación entre experimentos y teoría.

11. Las citas son de la reseña del libro que hizo Oldenburg en *Phil. Trans.*, n.º 79 (22 de enero de 1672), pp. 3.068-3.070. Posiblemente, Oldenburg era el único hombre de Inglaterra que realmente lo examinó en aquel tiempo.

A la larga, su investigación de la luz y los colores —hay que decir que no poco realzada, embellecida y retocada— la expondría con gran riqueza de detalles en *Opticks* y pasaría a ser el modelo de la ciencia experimental; su primera notificación fue lacónica y a muchos les pareció poco convincente. En parte fue debido a que en esta etapa apenas sabía cómo expresar su idea de lo que él consideraba las inferencias teóricas inevitables de su investigación sin atarse a declaraciones más profundas sobre la filosofía de la luz, de la cual ansiaba escapar. Cierta ineptitud, una ineptitud tal vez inevitable, le llevó entonces directamente a las polémicas que él procuraba evitar.

Newton también había leído a Descartes y comprendía a fondo el tratamiento matemático de la luz. Nos dice que, al igual que muchos otros, sentía gran interés por el perfeccionamiento de las lentes, para las cuales Descartes había propuesto curvaturas anesféricas. Newton siguió el mismo camino. Pero cuando obtuvo un prisma encontró motivos para hacer lo contrario y dejar su «vidriería». Al principio miraba a través del prisma, como a través de una lente, y para ver el efecto de la refracción en los colores pintó una línea recta y gruesa, en parte roja y en parte azul; al contemplarla a través del prisma, la línea ya no parecía recta. Daba la impresión de que «los rayos que forman el azul son más refractados que los que forman el rojo». Oscureció su habitación (en el First Court del Trinity College de Cambridge), dejando entrar la luz directa del Sol a través de un agujerito redondo, y haciendo que el rayo que se formaba así atravesara el prisma, y entonces vio que el espectro de «colores vívidos e intensos producidos de este modo» era un «agradable entretenimiento» hasta que se detuvo para preguntarse por qué el espectro no era redondo, como el rayo, sino alargado en la dirección normal al eje del prisma. También se preguntó si después de la refracción el rayo se curvaba o quedaba deformado de alguna otra manera. La respuesta era que el rayo azul se había visto más refractado que el rojo, de tal manera que la luz se descomponía ahora en una sola dirección (en realidad, de no haber descomposición, sería absolutamente imposible separar los retazos de colores distintos del espectro). Newton comprobó que, si bien los rayos que delimitaban la anchura del prisma divergían en 31′ de arco, correspondiendo al diámetro del Sol, los que delimitaban su longitud divergían en 29° 49′. Utilizando dos diafragmas perforados en su «experimento crucial», así como un par de prismas, se convenció a sí mismo directamente de que un

rayo rojo aislado sufría menos refracción en el segundo prisma que un rayo azul, y que a cada color separado se le clasificaba según su grado característico de refracción. Newton había descubierto que el color era una propiedad no sólo cualitativa, sino también matemática de la luz.

De ello dedujo que cada uno de los colores de los siete que detectó en el espectro era una identidad física, marcada cuantitativamente por su *x* física característica. A partir de Thomas Young la *x* ha significado longitud de onda (o su equivalente: frecuencia) para los físicos; en uno de sus escritos Newton estudia justamente esta idea, la del color identificador. Pero si, continuando con el modelo cartesiano, supusiéramos más bien que la luz es una corriente de partículas, entonces la *x* física podría ser giro, a la manera de Descartes, o masa, o velocidad. Newton rechazó firmemente la teoría de las ondas de la luz porque (arguyó, sin entender la refracción) la luz siempre se mueve en línea recta, mientras que las ondas describen una curva alrededor de los obstáculos; por lo demás, no tenía la menor idea de qué podía ser la *x* física y nunca resolvería la cuestión. Éste era el problema que deseaba evitar en la primera carta relativa a sus descubrimientos ópticos. En vez de ello, Newton pasó a su siguiente inferencia: si cada rayo tiene una identidad física, ésta no puede ser fruto de la refracción, sino que ya debía de existir antes de ella. Esto es, «La luz misma es una mezcla heterogénea de rayos refrangibles de diferente modo», y el prisma actúa simplemente de filtro óptico (como diríamos ahora) que separa los siete miembros que constituyen la luz blanca, a los que sería posible combinar de nuevo haciéndolos pasar por un segundo prisma inverso al primero o en el foco de una lente. Si uno de los rayos constituyentes quedara bloqueado, entonces no podría formarse de nuevo la luz blanca.

Newton comprendió entonces que era imposible enfocar exactamente la luz blanca con una lente, ya que la distancia focal de cada color constituyente era ligeramente distinta: de aquí los molestos bordes de color que aparecen en las imágenes de los telescopios y microscopios. Aunque las lentes anesféricas podían corregir la aberración esférica, los bordes no desaparecerían:

> Esto me hizo considerar las reflexiones, y encontrándolas regulares ... Tengo entendido que por su mediación los instrumentos ópticos podrían alcanzar cualquier grado de perfección imaginable,

> siempre y cuando pudiera encontrarse una sustancia reflectante, que pudiera pulimentarse tan finamente como el vidrio, y reflejar tanta luz como el vidrio deja pasar, y conseguirse también el arte de comunicarle una figura parabólica.

En 1668, según parece, Newton construyó un minúsculo reflector[12] cuya abertura era de 2,50 centímetros —con este tamaño la parabolización exacta no era importante— y escogió un bronce blanco y duro para los espejos que él mismo hizo. Ampliaba unas treinta veces —tantas como el mejor telescopio de Galileo— y permitía ver los satélites de Júpiter (de hecho, no están muy por debajo del límite de visibilidad de los ojos dotados de buena vista y sin ayuda de ningún aparato). Este asombroso instrumento fue la causa de que en el invierno de 1671-1672 Newton se hiciera súbitamente famoso y escribiese su primera carta sobre óptica, fechada el 6 de febrero de 1672, para explicar el trasfondo experimental y teórico de su invento.[13]

Se produjo entonces una enorme polémica, ya que los contemporáneos de Newton se escandalizaron mucho al leer su doctrina de la homogeneidad de los siete rayos espectrales de color y la consiguiente heterogeneidad de la luz blanca formada por la suma de los mismos. Siempre se había aceptado como axiomática la naturaleza sencilla de la luz blanca. La prueba de que todos los colores del espectro son igualmente primarios y necesarios en la luz blanca era directamente contraria al concepto de tales colores como el resultado de mezclas de rojo y azul, o de azul y amarillo. Si bien algunos teóricos del empirismo vieron con agrado la utilización baconiana del experimento por parte de Newton, muchos que se habían enorgu-

12. Después de una prehistoria de sugerencias, la forma gregoriana del telescopio reflector la describió James Gregory en *Optica Promota*, Londres, 1663; Newton rechazó este modelo por el suyo propio. El reflector newtoniano sólo requiere una superficie curva y nada de pérdida de luz en el espejo del objetivo. Gregory había intentado en vano que los fabricantes de instrumentos de Londres realizasen su proyecto. Los citados fabricantes tampoco produjeron una versión grande y buena del newtoniano.

13. Las citas que aparecen en los últimos párrafos son de su carta (*Correspondence of Newton*, I, 1959, pp. 92-102). Ni Newton ni ninguno de sus críticos había encontrado el *Thaumantias liber*, de Marcus Marci (Praga, 1648; reimpresión ed. por Jiri Marek, Praga, 1968), que contiene muchos experimentos nuevos con los colores, incluyendo los de las pompas de jabón y la defracción, así como el descubrimiento de la descomposición y la siguiente afirmación (teorema XX, p. 100): «La refracción que afecta a un rayo de color no cambia la especie de su color». Las ideas teóricas de Marci sobre sus observaciones eran confusas.

llecido de su conocimiento de la óptica se mostraron hostiles. Las reacciones de los críticos, Hooke y Huygens entre ellos, son interesantes. Al aparecer el primer escrito de Newton en las *Philosophical Transactions*, juzgaron que se trataba de meras especulaciones e intentaron responder a ellas con argumentos que no venían al caso. Luego negaron que los experimentos dieran los resultados descritos por Newton, o dijeron que si los experimentos eran correctos, las conclusiones que de ellos se sacaban eran falsas. Finalmente, alegaron que si bien las ideas de Newton eran justificables, no eran originales. Dejando aparte a los críticos poco importantes, es dudoso que Hooke o Huygens —dos de los líderes del movimiento científico— lograsen alguna vez ajustar del todo su pensamiento a los datos resultantes de los experimentos de Newton. Hooke nunca entendió que su propia teoría de las pulsaciones no podía explicarlos. Huygens, en su *Traité de la lumière* (1690), omitió diplomáticamente toda alusión al tema del color. Su fracaso no es más sorprendente que el de otros científicos de períodos más recientes que también se han resistido a innovaciones que inevitablemente han aplastado sus críticas. Las proposiciones de Newton eran revolucionarias, no sólo por su contenido, sino también porque se fundaban francamente en datos nuevos obtenidos mediante experimentos. En cierto sentido, el hecho de que unas conclusiones tan obvias sacadas de experimentos fácilmente repetibles fueran tratadas como cuestiones para el debate es un indicio de la superficialidad del cambio de espíritu efectuado por la revolución científica.

Dicho esto, debemos reconocer ciertas complejidades. En primer lugar, el pensamiento del propio Newton —el camino que le llevó a las conclusiones acerca de la naturaleza de la luz publicadas en 1672— no era tan sencillamente inductivo como él pretendía: esto es, avanzó por dicho camino con la ayuda de unas muletas teóricas, ayuda que le desagradaba reconocer en público. Siempre creyó que la teoría de emisión o de partículas de luz debía ser cierta. Algunos rasgos de su sistema óptico completo no tienen sentido a menos que sea así. Por otra parte, nunca estableció, ni en público ni en privado, un vínculo definitivo entre el color y la hipótesis de las partículas de luz, por lo que no puede decirse que en su tratamiento del color haya algo que dependa encubiertamente de dicha hipótesis. En segundo lugar, cuando escribió sus primeras cartas sobre óptica Newton ya sabía de los colores de las placas delgadas: colores de interferencia,

anillos de Newton. Por lo tanto, de acuerdo con la «doctrina» newtoniana de la heterogeneidad de la luz blanca, también la placa delgada debía actuar como filtro, dependiendo la acción filtrante de la delgadez de la placa o, para ser más exactos, de múltiples delgadeces. Newton no habló para nada de este fenómeno en su carta de 1672, pero sí aludié a él en un escrito mucho más largo sobre óptica que presentó a la Royal Society a finales de 1675. En él daba una explicación detallada de los anillos de interferencia, y proponía la arbitraria hipótesis de que, no siendo la «luz» el éter que llena el espacio, ni siquiera una vibración de dicho éter, pese a ello (sea cual sea su naturaleza) hay que suponerla capaz de crear vibraciones en el éter.[14] Estas vibraciones luego, de una manera totalmente inexplicada, cuando igualan las dimensiones de una placa hacen que ésta transmita un único color. Así, de una manera peculiar, la teoría de las ondas fue reintroducida *ad hoc* a un nivel secundario, y aunque Newton dice que él no tiene ninguna obligación para con dicha teoría, la repitió en *Opticks*, levemente disfrazada como los «ajustes de la reflexión fácil y de la transmisión fácil». La doctrina básica de la heterogeneidad de Newton no era suficiente para todos los fenómenos de los colores sin el refuerzo de una hipótesis mecánica auxiliar.

Como dice el propio Newton, su creencia en que «la blancura es una mezcla desemejante de todos los colores» fue considerada como «la más paradójica de todas mis afirmaciones, y [ha] encontrado los prejuicios más universales y obstinados». Sin embargo, a su juicio era «infaliblemente verdadera y cierta».[15] ¿Había probado Newton que la naturaleza de la luz no se ve modificada por ningún proceso creador de color, tal como la refracción? Algunos historiadores han afirmado que no: «[el experimento] no prueba que las propiedades de la luz refractada existan primariamente e inalteradas en la luz blanca. Pudiera ser que tales propiedades las fabrique el prisma a partir de la luz blanca, pero, una vez generadas, no pueden alterarlas nuevas refracciones».[16] La segunda frase es injusta para con la técnica de Newton, pues demostró (aunque, de hecho, no lo hizo en la primera carta publicada) que un prisma similar, colocado a la inversa en relación con el primero, combina de nuevo los rayos de

14. *Ibid.*, p. 378.
15. *Ibid.*, p. 385.
16. I. A. Sabra, *Theories of light from Descartes to Newton*, Oldbourne, Londres, 1967.

color descompuestos de modo que éstos reconstituyen la luz solar blanca: dos prismas, separados, actúan como un solo cristal de sección cuadrada. Esto es similar a la división analítica química del agua, por medio de electricidad, en hidrógeno y oxígeno, y la síntesis mediante descarga eléctrica de estos gases en agua. ¿Acaso no se consideraría como casuística la pretensión de que los dos gases habían sido «fabricados» a partir de agua homogénea? El error de Newton no estaba en la interpretación lógica de sus experimentos, sino en su seguridad irreflexiva de que la descripción de dos o tres de ellos convencería a sus lectores críticos. De hecho, debido en parte a la crítica de Huygens de la teoría newtoniana, en parte a que Mariotte repitió de forma incompetente los experimentos en París en 1679, comprobando que los rayos de color del prisma mostraban más dispersión y separación de colores, la teoría de Newton no fue aceptada en el continente hasta después de 1707. En años subsiguientes sus experimentos fueron verificados varias veces, tanto en la Royal Society como en Francia; en 1722 apareció en París una traducción de *Opticks* al francés.[17] Para entonces, por supuesto, los ingleses suscribían desde hacía mucho tiempo el punto de vista de que el incomparable Newton había

> inventado y establecido la teoría de la luz y los colores; y por medio de demostraciones fundamentadas en experimentos y observaciones, a la vez empezó y terminó aquel gran descubrimiento, y avanzó aquella parte de la óptica ... de la que había poco, si había algo, conocido anteriormente, hasta una ciencia perfecta y completa.[18]

Los más importantes descubrimientos de Newton, porque eran originales y porque su propia filosofía natural había cobrado forma, desde sus primeros años, contra el sistema neocartesiano predominante a la sazón, dieron a muchos de sus contemporáneos la sensación de que Newton perturbaba caprichosamente las ideas aceptadas sobre los procesos naturales con el fin de explicar fenómenos que el citado sistema era capaz de abarcar bien sin necesidad de cataclismos

17. Henry Guerlac, *Essays and papers in the history of modern science*, Johns Hopkins University Press, Baltimore y Londres, 1977, pp. 479-488; *Correspondence of Newton*, VII, *passim*.

18. F. Hauksbee, *Physico-mechanical experiments on various subjects*, Londres, 1719², prefacio.

intelectuales. En el nuevo siglo Leibniz acusaría a Newton de retrasar el reloj y renunciar a las ventajas que el mecanismo cartesiano había comprendido. Ya antes de finalizar el siglo XVII la antigua antítesis entre «antiguos» y «modernos» empezaba a quedar exánime, y las divisiones entre los diversos grupos modernos eran cada vez más críticas. La apelación a los experimentos y la observación había sido útil en la resolución de la antigua antítesis, pero la apelación a una nueva concepción de lo que debía ser la ciencia, a una nueva imagen de la naturaleza, a unas nuevas matemáticas y a una nueva estructura del razonamiento, en resumen, a una nueva valoración de datos conocidos, había obtenido resultados mucho más amplios En muchos sentidos, la experimentación y la observación genuinas habían sido los ejes de la biología del siglo XVII mucho más que de su mecánica y su física. Con la reacción empírica contra la ciencia cartesiana, que durante un momento había parecido casi resumir toda la revuelta contra la tradición, y en especial con los descubrimientos de Newton, llegó la prueba de la capacidad de los herederos de Copérnico y Galileo para resolver sus propias contradicciones internas. Para que éstas no desembocaran a su vez en un debate inacabable, como el que había embrollado a los herederos de Aristóteles, lo único que podía hacerse era prestar una atención más rigurosa a los criterios de la experimentación. La importancia fundamental del método científico de Newton fue el hecho de conseguir exactamente esto; no se limitó a demostrar que una teoría concordaba más o menos con un grupo selecto de datos, sino que un grupo —por muy limitado y restringido que fuese— de proposiciones teóricas podía ir asociado a una gama de datos experimentales, cuidadosamente comprobados y repetidos a menudo. A este grupo de proposiciones se le podía otorgar confianza porque era único, y el mínimo necesario; porque sólo pretendía comprender una gama limitada de fenómenos que habían sido estudiados con exactitud y no extrapolar de unos pocos detalles a verdades universales. Ante este método eran a la larga inútiles las críticas como las que se hacían a la teoría newtoniana del color, como lo eran también las dirigidas contra Lavoisier o Joule. Si, en el caso de Newton, las expresiones de incredulidad tenían menos fundamento, ello era quizá debido a que aún no se entendía su forma precisa de usar el método experimental.

Antes de estudiar con mayor profundidad el lugar de Newton en la historia de la ciencia experimental, es aconsejable volver a hablar

de los logros del hombre que es considerado con justicia como el principal predecesor de Newton en este campo: Robert Boyle. Porque las investigaciones neumáticas de Boyle, ya mencionadas, no fueron más que episodios en una vida dedicada a la experimentación química.

La idea de que hay una «ciencia de los materiales» o, mejor dicho, de la transformación de sustancias, una ciencia peculiarmente química, apenas existía antes de finalizar el siglo XVI e incluso entonces ganó terreno lentamente. Las primeras especulaciones sobre la naturaleza o la composición de la materia, y sobre los procesos por medio de los cuales un tipo de materia se transforma en otro, formaban parte de la física y eran tan poco empíricas como el resto de la teoría física. Apenas tenían relación con el conocimiento práctico de ciertos grupos de artesanos. De modo parecido, distaba mucho de ser obvio que se necesitase una ciencia distinta para explicar cómo el pan que comemos se transmuta en carne y hueso. Un fisiólogo precientífico podía hablar de una «mezcla» en el estómago, pero este término, aunque utilizado con frecuencia por los químicos, no tenía ningún significado específico. Era una palabra hueca que no describía ni explicaba nada. Sin embargo, cuando ciertos experimentadores adoptaron la creencia de que todos los metales se componen variamente de azufre y mercurio —empleando los nombres «azufre» y «mercurio» en un sentido particular, distinto del que se les da en el habla corriente—, entonces sí es posible hablar de una actitud química ante la sustancia. Robert Boyle solía aplicar la palabra «químico» de esta manera, como refiriéndose a quienes pensaban y trabajaban de acuerdo con la teoría de los tres principios. Por lo demás, lo único que distinguía al químico de los demás hombres era la naturaleza de sus métodos: «Lo que se lleva a cabo con fuego —escribió Paracelso— es alquimia, ya sea en el horno o en el fogón de la cocina». En verdad que el químico era principalmente un pirotécnico, el cual sabía (o trataba de saber) cómo obtener ciertos resultados por medio de un calentamiento largo y suave o breve y feroz. Hasta finalizar el siglo XVII el análisis químico estuvo prácticamente reducido a la destilación destructiva por medio del fuego, en la cual la sustancia que debía analizarse era obligada a rendir sus aguas, aceites, sublimados, sales y *caput mortuum*. En este sentido, el refinador de metales, el jabonero y el destilador eran químicos; a principios del período moderno las prácticas de hombres más ilustrados eran apenas menos azarosamente empíricas que las suyas y poco más debían a la influencia orientadora de una teoría

distinta. Y, como las ideas químicas sólo se diferenciaron despacio de las que solían albergarse en la filosofía natural, también las técnicas químicas se independizaron muy gradualmente de las de la cocina y el taller. Incluso en tiempos de Lavoisier eran aún claramente visibles las señales de su origen artesanal. La balanza, símbolo de la ciencia química, se tomó en préstamo de los ensayadores de metales preciosos.

Los antecedentes prácticos inmediatos de la química de mediados del siglo XVII fueron los iatroquímicos o químicos médicos que preparaban medicamentos. Eran hombres cultos y escribían en latín. Su criterio era estrecho, limitado por la doctrina de los tres principios, y caían con frecuencia en los engaños de la alquimia, pero escribían sus libros con la intención de que se entendieran. No crearon ningún lenguaje secreto. En lugar de ello comenzaron a describir, con tanta sencillez como permitían sus conocimientos y su terminología, cómo se llevan a cabo las operaciones de la química, qué materiales y métodos se utilizan para preparar gran número de compuestos, y para qué fines podrían usarse. Empezaron a comparar el método empleado en un caso con el que se empleaba en otro, a detectar analogías entre compuestos diferentes y a tratar de explicar qué pasaba cuando una reacción química era fruto de conceptos inventados o adaptados por ellos. Se trataba de los inicios de una «historia natural» de la química tanto como de una teoría química.

Sin embargo, los iatroquímicos no presentaron ninguna filosofía natural, sólo el sistema impreciso de los tres principios (sal, azufre, mercurio) contra los cuatro elementos de los alquimistas. Es cierto que la filosofía natural fue magnífica y ampliamente presentada por Van Helmont, pero, a pesar de ello, ha sido en su mayor parte ininteligible desde entonces hasta nuestros días. Boyle, que admiraba mucho a Van Helmont, a quien consideraba como el primer filósofo químico verdadero, confesó que con frecuencia era incapaz de entender lo que decía y que era imposible dar crédito a muchas de sus descripciones de experimentos y curas. Van Helmont enseñó que hay sólo dos elementos: el aire y el agua. El fuego no es un cuerpo y, por ende, tampoco es un elemento. Todos los cuerpos sólidos, cuyo tipo es la tierra, son generados a partir del agua por la acción de semillas o fermentos: «Los primeros comienzos de los cuerpos, y de las causas corporales, son dos y nada más. Son sin duda el elemento Agua, a partir del cual se forman los cuerpos, y el fermento en virtud del cual

se forman». Estos fermentos de creación divina eran los organizadores específicos del agua, la *prima materia*, en los minerales además de en las cosas vivas; los fermentos eran inmateriales, pero las semillas a las que daban origen no lo eran. Un experimento famoso ilustró esta última creencia: un sauce colocado en una cuba ganaba 75 kilos de peso por su crecimiento durante cinco años, aunque no se le añadiera nada más que agua. Al igual que Boyle haría más tarde, Van Helmont atacó los tres principios de los químicos ortodoxos alegando que algunos cuerpos no podían resolverse en ellos. Aceptó la existencia de vacíos en la materia sólida: porque esto explicaba cómo los metales podían ser más densos que el agua. El aire, sin embargo, no podía transformarse en agua, ni siquiera mediante una gran compresión, y, por lo tanto, era un elemento distinto. Otros dos rasgos importantes del sistema de Van Helmont eran el Blas y el Gas. El primero era un principio de movimiento o vitalidad; la segunda palabra no tenía en modo alguno la connotación moderna, sino que denotaba un estado del agua más fino que el vapor, pero más denso que el aire, en el cual el Agua era redistribuida por el universo. También llamaba «gas» a las exhalaciones desprendidas por la uva en fermentación o por la solución de plata en ácido nítrico, y reconocía que no todos estos «gases» eran idénticos.

Tanto la justificación experimental como la utilidad teórica del término «gas» no se darían a conocer hasta finales del siglo XVIII, después de un largo período en el que la palabra «aire» (calificada, si era necesario, por adjetivos tales como «fijo», «inflamable» o «eminentemente respirable») se utilizó en el mismo sentido que el nombre general que describe un estado en el cual la materia es dispersa, fluida o elástica. Que las sustancias aeriformes o gaseosas cumplen una función esencial en los fenómenos de la química no se hizo evidente, de manera gradual, hasta los experimentos que Stephen Hales publicó en 1727 (capítulo 13). Esa evolución histórica subsiguiente no le debía nada a J. B. Van Helmont.

Así, pues, a mediados del siglo XVII la situación de la teoría química (utilizo lo que aún es un anacronismo) era ésta: la doctrina aristotélica, ya moribunda y opuesta a la tendencia general de la revolución científica, seguía siendo respetable; los químicos en ejercicio, como clase, se mantenían fieles a sus tres principios y a los dogmas generales de la iatroquímica; la teoría de los dos elementos de Van Helmont despertaba mucho interés, pero ganaba pocos parti-

darios. Mientras tanto empezaba a tomar forma una cuarta manera de abordar los problemas de la combinación química, una manera basada en el concepto mecánico, particulado, de la materia. Robert Boyle no tardaría en darle mayor complejidad. El conocimiento objetivo de las reacciones y procesos químicos también se había ramificado mucho desde la época de Beguin y Libavius. El propio Van Helmont era un hábil químico práctico y dio cuenta de un buen número de preparados nuevos. Enseñó que la materia era indestructible y adujo como ejemplo de ello la recuperación del peso original de un metal a partir de los compuestos en los cuales se hallaba aparentemente disfrazado. Se dice que utilizaba mucho la balanza: su famoso experimento con el árbol muestra cuán engañosos pueden ser los métodos cuantitativos si se aplican dentro de un esquema conceptual inadecuado. Un iatroquímico más joven (que también iba en pos de la piedra filosofal) era Johann Rudolph Glauber (1604-1670). Fue el primero en describir la preparación de espíritu de sal (HCl), sulfato sódico y tal vez cloro. Glauber tenía una idea clara de ciertos tipos de reacción química tales como la descomposición doble; por ejemplo, explicó la formación de «mantequilla estibina de antimonio» con sublimación de cinabrio a partir de estibina calentada con sublimado corrosivo diciendo que el espíritu en este último, dejando el mercurio, prefería agregarse al antimonio en la estibina; el mercurio se unía luego con el azufre en la estibina para formar el cinabrio. Este ejemplo indica claramente que Glauber empleaba el concepto de la afinidad química: comprendió que una unidad en una reacción podía atraer a otra más que una tercera.

En 1675 se imprimió un nuevo libro de química escrito por un hombre práctico, Nicholas Lemery (1645-1715), libro que siguió siendo popular durante más de medio siglo. Su título, *Cours de chymie contenant la manière de faire les operations qui sont en usage dans la medicine*, es suficientemente explicativo. Era un sencillo libro de recetas que se ocupaba primero de los metales, después de las sales, el azufre y otros minerales, y finalmente de los preparados que se obtenían de vegetales y animales. Lemery no era dado a teorizar, pero enseñó que, además de los tres principios activos —el mercurio (espíritu), el azufre (aceite) y la sal— había dos principios pasivos, el agua y la tierra. También aceptó la teoría de Otto Tachenius según la cual sal = ácido + álcali, y de vez en cuando seguía las ideas particuladas de Descartes, al menos hasta el extremo de suponer inge-

nuamente que las partículas componentes de los ácidos eran muy puntiagudas, que las de los álcalis contenían huecos, etcétera. En el aspecto teórico, Lemery es ecléctico hasta rozar la incoherencia. A finales del siglo XVII las mejores descripciones de química experimental —y había muchas, siendo un ejemplo inglés el *Compleat course of chemistry* (Londres?, 1699), de George Wilson— seguían siendo las que se escribían pensando en aplicaciones médicas y aunque había desaparecido la antigua y esotérica iatroquímica derivada de Paracelso, el progreso futuro les debería mucho a los médicos y apotecarios, entre ellos Boerhaave, Cullen, Scheele y Black. También es significativo que en las universidades, donde la enseñanza de la química empezó hacia 1700, la presentaran como auxiliar de la medicina. Incluso al terminar el siglo XVIII la mayoría de los alumnos de Black en Edimburgo eran estudiantes de medicina. Desde la época de Boyle hasta la de Priestley y Cavendish el papel de los «aficionados» en la química fue relativamente insignificante y la razón no es difícil de encotrar. Era un período en el que se estaba produciendo un rápido desarrollo del aspecto práctico del tema, pero una escasa expansión teórica.

La aplicación racional de la química a la medicina fue lo primero que llamó la atención de Robert Boyle, que nunca dejaría de interesarse por ella. Pero con el paso de los años este objetivo modestamente utilitario se vería dominado por una ambición mucho más amplia: incluir la química (un conjunto de conocimientos y habilidades empíricas) dentro de la filosofía natural experimental, de hecho, hacer de ella el núcleo de tal filosofía verdadera. Boyle era uno de los principales teóricos de la filosofía mecánica o corpuscular (aunque él prefería tratar esto de una forma característicamente general o ecléctica a abrazar el sistema atomista, cartesiano o cualquier otro), así como un consumado experimentador, tanto físico como químico. Sus obras son las primeras que consisten principalmente en la descripción de investigaciones experimentales: contribuyó mucho a perfeccionar la técnica precisa, los principios del análisis químico y el estudio de la composición química. Los escritos de Boyle pueden parecer descuidados, incluso (engañosamente) fortuitos en su selección y distribución, prolijos hasta resultar casi insoportables y, en último caso, aparentemente indefinidos —pues, aunque el propio Boyle tenía un concepto bastante decisivo de las cosas, detestaba mostrarse dogmático en público—, pero sabía cuál era exactamente

el objetivo de sus experimentos y en qué medida lo alcanzaba. Ejercía el control completo de la extensa labor que se hacía en su propio laboratorio de investigación y anotaba y reunía los detalles precisos de cada experimento. Probablemente, fue el primer químico que comprendió la importancia de usar sustancias puras y contemplar las operaciones con ojos críticos; por ejemplo, escribió lo siguiente acerca de un «químico famoso» y de su método de preparación de las sales cristalinas de los vegetales, método que llevaba aparejada la solución en ácido nítrico:

> ... durante varios años antes de encontrar su proceso he hecho buen salitre inflamable con sales fijas de más de una clase de vegetal, uniéndolas con aquafortis, y, después de un rato, exhalando la humedad superflua; por lo cual os será fácil adivinar cuán juiciosamente se prescribe la solución en aquafortis [por el «químico famoso»] sólo como una depuración y cuán dignos de crédito son tales autores cuando atribuyen a estas sales cristalinas las diversas virtudes ... de los respectivos vegetales, de las cuales se obtuvieron los álcalis.[19]

Boyle vio claramente cómo el producto final de un procedimiento químico podía ser una sustancia que en nada se derivase del apreciado ingrediente primario. También era muy consciente de la importancia de repetir los experimentos, y de lo difícil que era reproducir los posibles efectos de ello, especialmente cuando el mismo experimento lo llevan a cabo diversos individuos. A diferencia de sus predecesores, no usaba los resultados de una sola prueba para justificar conclusiones generales.

La tarea que Boyle se impuso a sí mismo consistía en examinar filosóficamente los fenómenos naturales que el arte químico daba a conocer; determinar la naturaleza subyacente de las transformaciones materiales cuya descripción cumulativa se había edificado desde la época de Libavius y de los procesos que las producían. Se comprometió a demostrar a los filósofos que la química podía ser algo más que una colección de recetas, así como indicar a los «químicos» que, al revelar la naturaleza de los secretos, tendrían un objetivo más

19. R. Boyle, *Usefulness of natural philosophy*, parte II, ensayo 5, cap. 6; *Works*, 1772, II, pp. 134-135; citado en Marie Boas, *Robert Boyle and seventeenth century chemistry*, Cambridge U. P., Cambridge, 1958, p. 214.

noble que la mezcla de medicinas, pues se daba cuenta de que la filosofía natural en conjunto es más grande incluso que la curación de la enfermedad. Boyle no escribió ningún libro de texto para enseñar química, como hizo Lemery, sino que más bien daba por sentado que sus lectores poseían tal nivel de conocimientos; tampoco le interesaba mucho la simple acumulación de más y más conocimientos empíricos. Casi siempre escribía pensando en un problema definido, algún aspecto de su ambición de restaurar la filosofía natural como conjunto unificado, en el cual los conocimientos empíricos tendrían su papel. Procuró tender un puente entre la química y la física, las dos ciencias que trataban de las propiedades de la materia, y que debían partir del terreno común y ser cada una explicable en términos de la otra. En esto Boyle tenía mucho en común con Van Helmont; pero mientras que éste había criticado a los filósofos de la naturaleza por desconocer ideas a las que él había llegado en el curso de su evolución casi paracelsiana, Boyle procedió de manera muy diferente. Dotado de una perspectiva filosófica moderna, Boyle opinaba que los fenómenos del cambio químico había que explicarlos en términos de la estructura física subyacente, mediante la teoría de la materia en movimiento. Fue un caso único entre los físicos por su deseo de dominar todos los detalles de la técnica y la nomenclatura de la química, único entre los químicos por sustituir sus vagas ideas cualitativas por los conceptos mecánicos, precisos y potencialmente cuantitativos de los físicos. Así, pues, establecía una distinción entre «una explicación química de un fenómeno y una que sea verdaderamente filosófica o mecánica»: la primera era en términos de substancia; la segunda, en términos de los desplazamientos de partículas.[20]

En la primera de sus principales obras publicadas, que es también la más leída, esto ciertamente no queda muy claro. Como da a entender su título, el propósito del *Sceptical chymist* [El químico escéptico] (1661) es negativo en vez de positivo. Consistía en librarse de las tres actitudes teóricas ante la química que a la sazón estaban en boga. Boyle se deshizo rápidamente de los cuatro elementos aristotélicos, pues ya no eran entidades plausibles (al menos para el científico experimental progresista). El ataque principal lo dirigió contra los tres principios de los químicos ortodoxos, que eran su verdadero blanco. En este sentido no había nada original en su propia definición

20. Marie Boas, *ibid.*, pp. 106-107.

de un elemento químico, ni en su insistencia en lo importante, que era descubrir cuáles son los constituyentes esenciales de los cuerpos compuestos. Arguyó que ninguno de los principios de los químicos podía extraerse de metales como el oro o el mercurio; que su criterio del análisis por el fuego era de todas formas defectuoso, ya que no podía dividir el vidrio en sus propios constituyentes: arena y álcali. Señaló (al igual que Van Helmont) que la naturaleza de los cuerpos no cambia cuando éstos se combinan con otros, toda vez que a veces los mismos cuerpos podían recuperarse por separado en su estado original. Hizo especial hincapié en las faltas de lógica y las contradicciones que solían envolver las ideas de los químicos. La crítica era justificable, pero en el *Sceptical chymist* Boyle probaba igualmente que era incapaz de crear algo para reemplazar a lo que destruiría. No creía más que sus contemporáneos que las sustancias ordinarias —oro, mercurio, azufre— fuesen elementos, aunque se resistieran al análisis. Utilizó el experimento de Van Helmont con el árbol (que él repitió) para demostrar que era posible formar materia vegetal a partir de agua sola, sin la intervención de tierra y fuego, o de sal y azufre, pero no creía que todas las cosas estuviesen hechas de agua. Al final Boyle no sólo no confeccionó su propia lista de elementos químicos, sino que ni siquiera sacó una conclusión definida sobre si existen tales sustancias sencillas. De hecho, en su física corpuscular había motivo suficiente para que tuviese dudas, para que pensase que una cosa, la que fuera, podía transmutarse en cualquier otra cosa, por obra de la naturaleza si no del arte. Algunos de los datos se exponen en el *Sceptical chymist*: Boyle, como la mayor parte de su generación, creía que los metales y los minerales como el salitre «crecían» en la tierra. Estas sustancias no eran elementos por sí mismas; ni estaban formadas a partir de elementos preexistentes, pues de éstos no se encontraban vestigios en la tierra donde se producía el crecimiento. «De ahí —escribió Boyle— podemos deducir que la tierra, mediante un principio plástico metálico latente en ella ("semilla"), puede con el tiempo transformarse en un metal.» Era una opinión bastante frecuente. Tras estudiar varios fenómenos de esta clase llegó a la conclusión de que las transmutaciones, en el sentido químico de la palabra, eran posibles por medio de este «poder plástico» en la tierra, como también lo eran por la «virtud germinal» en las semillas (pues las sales, etc., de la madera ciertamente no estaban presentes como tales en el agua con la cual se nutría el árbol). Por

desconcertante que esto pudiera ser desde el punto de vista del químico, no era en absoluto inexplicable para el físico que había en Boyle, porque su teoría física de la materia le enseñó que todas las sustancias se componen de las mismas partículas fundamentales. Por consiguiente, dado que las sustancias difieren unas de otras sólo en las «diversas texturas resultantes del tamaño, la forma, el movimiento y el dispositivo de sus partes pequeñas, no sería irracional concebir que un mismo lote de la materia universal pueda, mediante varias alteraciones y contexturas, llegar a merecer el nombre, a veces de cuerpo sulfúreo y a veces de cuerpo terreno o acuoso».[21]

Boyle era partidario de una teoría de la materia que le llevó a creer (como reconoció en las primeras páginas del *Sceptical chymist*) que en su forma básica y primitiva la materia existía como «partículas pequeñas, de varios tamaños y formas, variamente movidas». Además, estas partículas estaban organizadas en «minúsculas masas o racimos», siendo las «concreciones primarias» de la materia, algunas de las cuales eran en la práctica indivisibles. De aquí que los racimos que componen el oro, al ser inviolables por el arte del químico corriente, siempre podían recuperarse de cualquier compuesto del metal. Pero una masa de tales corpúsculos no era un elemento, pues, como manifestó Boyle, las partículas de dos grupos de corpúsculos podían reagruparse de tal forma que «de la coalición puede surgir un cuerpo nuevo, como realmente uno, como cualquiera de los corpúsculos que había antes de mezclarse». Así, el vinagre actuando sobre el plomo formaba «azúcar» de plomo (acetato de plomo), pero en modo alguno podía recuperarse el espíritu ácido del nuevo compuesto; Boyle opinaba que sus corpúsculos eran destruidos. Los corpúsculos indivisibles del vidrio eran formados por una «coalición» de los de la arena y las cenizas; de modo que la resistencia al análisis químico por el fuego o los ácidos no era una prueba de su carácter elemental: pues tales corpúsculos indestructibles también podían encontrarse en los cuerpos debidos al arte, como en aquellos debidos a la naturaleza. La misma experiencia que enseñó

21. Boyle, *Works*, 1772, I, pp. 564, 494. Entre las transformaciones, Boyle estaba interesado, como es natural, por aquello que pudiera producir oro a partir de materiales viles. Hacia el final de su vida creyó poseer la clave para producir oro que no fuera (casi) químicamente inerte. Al parecer, Newton compartía con Boyle la filosofía básica de la estabilidad/mutación, pero terminó mostrando un gran escepticismo ante cualquier posibilidad práctica de fabricar oro. Cf. Marie Boas, *op. cit.*, pp. 102-107.

a Boyle que el vidrio no debía contarse entre los elementos le impidió saber si el oro era un elemento o no: él pensaba que probablemente no lo era.[22]

Evidentemente, la filosofía natural experimental de Boyle le impidió alcanzar lo que en general se ha considerado como uno de los conceptos esenciales de la química del siglo XIX: el concepto pragmático del elemento químico, definido formalmente por Lavoisier (1789). Ningún cuerpo hecho de partículas del modo concebido por Boyle podía considerarse como sencillo, homogéneo o elemental. Y, por desgracia, la cinética química seguiría siendo tan incomprensible para él como para Newton, que sin duda estaba más preparado para tener éxito en este hilo del pensamiento, toda vez que Boyle no poseía ninguna aptitud natural para la matematización de la naturaleza.

Que la teoría química de Boyle fue moldeada predominantemente por su física corpuscular se advierte en muchas obras además de en el *Sceptical chymist*. Boyle no era dogmático ni partidario de sistemas; creía que las hipótesis debían expresarse de manera que se ajustasen a los datos, mas para él estaba muy claro que el escepticismo y el aborrecimiento completos eran la antítesis de la verdadera filosofía. A decir verdad, su ambición de introducir la química en la filosofía natural no habría tenido sentido de no haber tenido a mano para tal propósito una teoría de la filosofía natural, que era en esencia una teoría de la materia:

> Esperaba que al menos podría prestar un servicio que no fuera inoportuno a los filósofos corpusculares, ilustrando algunos de sus conceptos con experimentos sensatos, y manifestando que las cosas tratadas por mí pueden cuando menos explicarse plausiblemente sin tener que recurrir a formas inexplicables, cualidades reales, los cuatro elementos peripatéticos, o los tres principios químicos.[23]

Así, pues, para Boyle la solución siempre representaba los esparcimientos de los corpúsculos del disolvente entre los del cuerpo disuelto, el fuego consistía en partículas materiales, y el «aire» de todas las clases consistía principalmente en corpúsculos elásticos de un tipo determinado, entre los cuales la mezcla de otros corpúsculos daba a

22. Boyle, *Works*, 1772, I, pp. 474-475, 506-507.
23. *Certain physiological essays* (1661); Works, 1772, I, p. 356.

cada «aire» su carácter propio. Atribuía constantemente las propiedades de los ácidos, aceites, sales, etcétera, a la naturaleza de los corpúsculos que los componían. De hecho, la teoría entraba en juego cada vez que Boyle comentaba un experimento químico. Los ejemplos son especialmente numerosos en *Origin of forms and qualities* (1666), donde (como ejemplos escogidos al azar) hablaba del «cuerpo de la plata, mediante la conveniente interposición de algunas partículas salinas [siendo] reducidas a cristales» de plata cornea (cloruro de plata); o, de otro experimento, «consideré que los corpúsculos nitrosos [del ácido nítrico], alojándose en los pequeños espacios abandonados por los corpúsculos salinos de la sal marina, que pasaban al receptor, habían proporcionado este álcali», o también que

> los corpúsculos más nobles que permiten al oro parecer amarillo [y resistirse al ácido nítrico] ... pueden ver su textura destruida por un menstruo muy penetrante, o, mediante una mayor congruencia con sus corpúsculos, que [con] los de la restante parte del oro, pueden acercarse más al primero y ... ser extraídos.[24]

Las ideas corpusculares las desarrollaron de manera especial los científicos ingleses en relación con las reacciones afines de la combustión y la calcinación. Antiguamente ambas eran consideradas como separaciones: la ceniza o la cal (óxido) era un residuo terroso que quedaba después de que las partes más volátiles del combustible o metal hubiesen sido apartadas por el fuego. Era bien sabido, no obstante, que la cal (óxido) superaba en peso al metal original: de ahí que Jean Rey fuera inducido a creer (en 1630) que, si bien la cal era de naturaleza más ligera que el metal, se hacía más pesada al agregársele aire que se había espesado en el horno. Boyler opinó más adelante que el incremento de peso se debía a partículas de fuego que, después de penetrar por las paredes del crisol, impregnaban la cal. Esta explicación fue aceptada universalmente hasta que Lavoisier la refutó de modo decisivo. Con respecto a la combustión, Boyle y otros sabían muy bien que los cuerpos no ardían sin aire, a menos que (como la pólvora) contuviesen algún material nitroso. Un experimento conocido (descrito originalmente por Van Helmont) demostró que cuando se hacía arder una vela en una vasija cerrada sobre agua el aire del interior disminuía y el agua subía por dentro. Partiendo de

24. *Origin of forms and qualities* (1666); *Works*, 1772, III, pp. 95-96.

estas y otras observaciones, Robert Hook esbozó una teoría en *Micrographia* según la cual los cuerpos combustibles eran disueltos por cierta sustancia presente en la atmósfera, desprendiendo esta solución (al igual que otras) mucho calor y, por ende, llamas, que Hooke creyó que no eran «nada más que una mezcla de aire, y partes sulfúreas volátiles de cuerpos disolubles o combustibles, los cuales están actuando unos sobre otros». Esta sustancia aérea la identificó con «aquella que está fijada en el salitre».

Tal como se ha descubierto en años recientes, la teoría de Hooke relativa al nitro aéreo distaba mucho de ser original: probablemente Hooke (y otros) la sacaron de sir Kenelm Digby, pero sus orígenes literarios (por lo que se sabe hasta ahora) se hallan en un libro que en 1604 escribió un alquimista polaco, Michael Sendivogius.[25] Sus orígenes empíricos están en la acción fertilizante del nitro y el estiércol animal, la conocida relación entre el estiércol y el nitro, y la facultad que tiene éste de aguantar la combustión (y, al decir de algunos, la vida humana). Un médico inglés, John Mayow (1645-1679), desarrollaría la idea de las «partículas nitro-aéreas», supuestamente presentes en el aire y el nitro y, de hecho, distribuidas con gran profusión en la naturaleza, hasta convertirla en una amplia filosofía especulativa; estas partículas, así como sus violentas reacciones con partículas «sulfúreas» en los cuerpos orgánicos y combustibles explicaban no sólo el fuego, las llamas y la respiración, sino también los relámpagos y el cuerpo ardiente del Sol, así como el calor animal (capítulo 6).[26] Aunque Boyle, con la conjetura de una «Quintaesencia» activa en el aire y sus propios estudios experimentales de la combustión, había traducido el nitro aéreo de la alquimia metafísica (donde se conocía con los nombres de «rocío» o «bálsamo») a la filosofía mecánica, no le convenció nada la idea de que el nitro era un agente causativo universal en la naturaleza; de hecho, dudó muy razonablemente (en vista de la dificultad de volatizar el nitro) de que existiese gran cantidad del mismo en la atmósfera:

25. Sendivogius a su vez atribuye su *Novum Lumen Chynicum*, Praga, 1604, a un *confrère* escocés, Alexander Seton. Véase Henry Guerlac, *Essays and papers in the history of modern science*, Johns Hopkins University Press, Baltimore y Londres, 1977, pp. 245-249.

26. Véase Robert G. Frank, *Harvey and the Oxford physiologists*, California University Press, Berkeley y Los Angeles, 1980.

> Sé que diversos hombres ilustrados, algunos médicos, algunos químicos y también algunos filósofos, hablan mucho de un nitro volátil que abunda en el aire, como si ésa fuera la única sal que lo impregna. Pero aunque coincido con ellos en pensar que el aire está en muchos lugares impregnado de corpúsculos de naturaleza nitrosa, sin embargo, confieso que hasta ahora no me he convencido de todo lo que se suele decir sobre la abundancia y la calidad del nitro en el aire; pues no he visto que los que edificaron tanto sobre este nitro volátil hayan demostrado por medio de experimentos competentes que en el aire haya tal nitro volátil en abundancia.[27]

La objeción de Boyle, por supuesto, no podía aplicarse a la aserción de que un ingrediente desconocido, *x*, es común tanto al aire como al nitro; esto es lo que, según algunos, dijo Mayow. Sin embargo, en tanto no se encontraron muestras de *x* procedentes del aire y del nitro y no se demostró que eran idénticas, Boyle consideraría tal aserción como una hipótesis que un filósofo experimental no debía tomar en serio.

Aunque Boyle nunca declaró *Hypotheses non fingo*, y, de hecho (al igual que Newton), él mismo propuso muchas, era muy consciente de la diferencia entre las especulaciones (por muy favoritas que fuesen) sobre la *estructura última* de la materia —especulaciones necesariamente fuera del alcance de los experimentos directos— y las afirmaciones positivas sobre la *composición sustancial* de las cosas, que carecían de valor si no eran verificadas. El aire, a su juicio, debía considerarse como una sola sustancia hasta que sus componentes fuesen identificados experimentalmente por el procedimiento químico normal. Esta cautela impregna su vasta producción científica. Creía en un estrato físico de explicación más profundo y más real que los comentarios cualitativos de los químicos de su época en términos de reacciones de sustancias, pero él, a diferencia de Mayow y otros, no podía aducir ejemplos exactos de cómo funcionaría esta forma de reduccionismo. Por este motivo le echaron la culpa filósofos como Spinoza y físicos como Huygens; como dice este último: «Parece bastante extraño que no edificase nada sobre la base de los numerosos experimentos que llenan sus libros».[28] Para ellos la filosofía

27. *General history of the air* (1692): *Works*, 1772, V, p. 627.
28. Huygens a Leibniz, 4 de febrero de 1692. *Oeuvres complètes de Christiaan*

mecanicista, con su vestido neocartesiano, era patentemente verdadera: ¿qué necesidad había de demostrarla de un modo simplemente general partiendo de los fenómenos de la química? Estos juicios no captaban la esencia de la labor de Boyle como filósofo de la naturaleza, que no era explorar la razón o inventar sistemas, sino investigar experimentalmente la naturaleza misma. Las ideas sistemáticas eran una guía de la investigación, pero no el fruto de la misma.

Recordando las aburridas recetas o la excéntrica invención de misterios que había en casi todos los escritos químicos de este período, recordando la repetitiva división analítica del material vegetal en tierra, aceite y agua efectuados por los químicos de la Academia de Ciencias de París, la estatura de Boyle como químico experimental y filósofo crece hasta alcanzar la grandeza. Nadie más en su campo y en su siglo fue tan lúcido, inteligente y racional como él. Nadie más, se ha dicho,

> hizo tanto para que se dejara de pensar en términos de elementos y principios químicos y se pensase en términos de sustancias sencillas y entidades reales que conservaban su individualidad como corpúsculos a lo largo de numerosas vicisitudes químicas ... La amalgamación de química y física y el desarrollo de una teoría mecánica racional en la química son indicio abundante de que la química del siglo XVII merece un puesto en la revolución científica del siglo XVII.[29]

Es decir, Boyle, al igual que su amigo Isaac Newton, fue un líder intelectual de dicha revolución.

Como método de investigación experimental, puede que el examen que durante toda su vida hizo Boyle del mecanismo químico parezca defectuoso por dos motivos principales, aunque el primero ciertamente y el segundo posiblemente eran inevitables a causa de la naturaleza de sus experimentos; Boyle expuso sus resultados de forma no matemática y no cuantitativa, y la relación entre resultado y teoría era imprecisa, sin una definición nítida. Si Henry Power en su *Experimental philosophy* (1664) señalaba solamente algunas deducciones e hipótesis probables en apoyo e ilustración de la hipótesis

---

Huygens, X, p. 239; A. R. y M. B. Hall en *Mélanges Alexandre Koyré*, Hermann, París, 1964, II, pp. 241-256.

29. Marie Boas, *op. cit.* (en nota 19), pp. 230, 231.

atómica, ¿había Boyle apuntado mucho más alto? O, utilizando la expresión de Hooke, ¿estaba en cuestión algo más que «la explicación de estos fenómenos por medio de varias hipótesis»? Dejando a un lado su despiste, confesado por él mismo (perder muestras que llevaba en el bolsillo, dejar papeles donde la doncella podía utilizarlos para encender el fuego), Boyle se mostraba más definido en lo que hace a ciertos resultados —la constitución del nitro, el aislamiento del fósforo— de lo que parece en obras tan extensas como el *Sceptical chemist*. Su defensa de la elasticidad y el peso del aire la argumentó con precisión. Y algunas investigaciones experimentales numéricas —por ejemplo, la de las leyes del choque que de modo tan complejo realizó Mariotte— no eran interesantes ni esclarecedoras: meramente rutinarias.

Sin embargo, las palabras de Henry Guerlac son sin duda apropiadas:

> Para Newton ... el experimento es esencialmente un artificio para resolver problemas, para determinar con precisión las propiedades de las cosas y ascender de estos «efectos» cuidadosamente observados a las «causas». Con mayor claridad de la que le fue posible a Bacon, Newton demostró por medio de su método que la experimentación podía conducir con al menos «certidumbre moral» a axiomas, principios o leyes.[30]

Es decir, si las aplicamos a las investigaciones del todo fructíferas de Newton conducentes (y las distinciones son suyas) a la enunciación de ciertas «doctrinas», proposiciones totalmente distintas de hipótesis causales o explicativas. Ejemplos de tales doctrinas son la heterogeneidad de la luz blanca y la existencia de la gravitación universal. Éstas, como dijo él, le fueron «mostradas, *no por inferir que es así porque no es de otra manera*, esto es, no deduciéndolo únicamente de una refutación de suposiciones contrarias, sino *sacándolas de experimentos concluyentes positivamente y directamente*».[31] De conformidad con esta declaración notablemente antipopperiana, Newton se tomó molestias infinitas por alcanzar la concordancia numérica

30. Las palabras proceden de la portada de Power; véase Henry Guerlac, *op. cit.* (en nota 17), pp. 208-215.

31. Newton, *Correspondence*, I, p. 209; 6 de julio de 1672. Las palabras son estrictamente aplicables sólo a la óptica, pero seguramente Newton las habría hecho extensivas a los *Principia* también en una fecha posterior.

exacta entre los resultados de la computación teórica y de las mediciones cuidadosas; a veces abandonaba la discreción para «ajustar» sus cifras con el fin de obtener una concordancia exacta. Obviamente, para alcanzar tal concordancia, así como la perfección de la ciencia experimental, es tan esencial que la teoría sea capaz de rendir predicciones cuantificables como hacer escrupulosamente los experimentos. En el campo de la óptica y en el de la mecánica el genio de Newton pudo elevar la teoría a semejante altura de excelencia, pero en la química no tuvo más éxito del que tuvo Boyle.

Newton añadió una importante dimensión hipotética a la cinética química: la de la atracción preferencial o afinidad, pero ni él ni sus sucesores (Keill y Friend) pudieron cuantificar fructíferamente *esta* atracción. Leer la cuestión 31 de *Opticks* es leer un ensayo de química teórica que va más allá de Boyle, pero cuyo carácter no es distinto del de los ensayos de Boyle. Es, en verdad, uno de los pocos pasajes extensos de las obras de Newton que bien pudieran haber salido de la pluma de Robert Boyle.

Capítulo 11

NATURALEZA Y NÚMERO

Hoy en día es normal presentar información de manera cuantitativa, empleando tal vez tablas o gráficos, y expresar teorías hasta donde sea posible por medio de funciones matemáticas, manipulándolas para demostrar plenamente la potencialidad de la teoría. Incluso en el ámbito de las ciencias sociales se aceptan sin reparo los modelos matemáticos, cuyo efecto es hacer que el enfoque puramente descriptivo de la economía o la antropología se convierta en algo pasado de moda. En el siglo XVII la idea de que los métodos matemáticos eran apropiados para las ciencias físicas avanzó lentamente al principio, aun cuando antes de finalizar el siglo John Graunt, William Petty y Gregory King ya habían introducido la idea de las estadísticas sociales. Nadie disputaba la legitimidad del lugar que los griegos habían asignado a la geometría en la realización de cómputos astronómicos, en el tratamiento de ciertas cuestiones de óptica y en ciencias aplicadas tales como la arquitectura, la cartografía y la mecánica. Los conflictos surgían cuando se intentaba hacer extensivas las matemáticas a la filosofía natural, pues esto daba a entender que la geometría (en particular) no se limitaba a ser una herramienta que se empleaba junto con el cartabón y el nivel, o una base para la estética, o algo útil para construir un modelo que, al igual que un mapa de la superficie de la Tierra, no podía pretender que era real, sino que también era capaz de representar la verdadera naturaleza física de las cosas o de utilizarse como una lógica válida para determinar la naturaleza de las cosas.

La cuestión de si nuestro conocimiento del universo puede o no

«matematizarse» (empleando la palabra de Alexandre Koyré) es metafísica; una cuestión afín, más próxima a nuestra propia época, podría ser la siguiente: ¿Hay en los procesos vivos algo que no sea explicable por medio de las leyes de la física y de la química? Pero es también una cuestión programática, pues si el filósofo de la naturaleza pregunta si el color de la luz es sustancial o accidental, penetra en un tipo de argumento técnico, mientras que si pide un análisis matemático del arco iris, entra en un reino del pensamiento totalmente distinto, un reino tan detestable para los peripatéticos como para los románticos. La imagen matemática del universo no responde a las preguntas que hacían los filósofos no matemáticos y viceversa. Esto resulta muy claro en el caso de Galileo, que fue el fundador de la filosofía matemática de la naturaleza. Cuando Galileo creó una teoría matemática de la resistencia de las vigas, el hecho no tenía nada que ver con la tradición vitrubiana de la arquitectura, aunque también ésta era matemática a su manera: porque Galileo consideraba las propiedades de las cosas, mientras que los arquitectos consideraban la forma humana de mirar las cosas. Más importante, como hemos visto, es que el tratamiento galileano del movimiento en términos de velocidades cuantitativas, aceleraciones y momentos no tiene nada que ver con la descripción imperante, aristotélica y postaristotélica, del movimiento en términos de causa. Así, pues, pedirle a un filósofo que creyera al universo capaz de matematización era pedirle que plantease nuevas cuestiones, aceptase nuevas respuestas y abandonase los antiguos problemas porque habían perdido interés y quizá no tenían absolutamente ningún sentido.

Por consiguiente, podemos afrontar de dos maneras los problemas históricos que supuso la creación de una física matemática durante el siglo XVII, pues esto es lo que entrañaba la matematización del universo: podemos considerar los cambios de las posturas metafísicas o la evolución operacional de nuevos segmentos del conocimiento, a los que sólo el método matemático podía dar existencia. La primera de las dos maneras es la que ha recomendado y adoptado E. A. Burtt:

> Debemos comprender el contraste esencial entre la visión moderna del mundo y la del pensamiento previo, y utilizar ese contraste claramente concebido como clave que nos permita escoger,

para su crítica y valoración a la luz de su evolución histórica, cada una de las presuposiciones significativas modernas.[1]

Más recientemente Koyré, en muchos de sus escritos, sobre todo en *Del mundo cerrado al universo infinito* (1957), ha abordado problemas parecidos. El presente capítulo, sin embargo, se concentrará en la obtención de nuevos conocimientos, tal como, de hecho, hizo Koyré en otros escritos. Pero, en primer lugar, cabe señalar, como hicieron los historiadores de las ideas metafísicas, que una física matemática en vez de cualitativa supone la aceptación tanto del carácter fundamentalmente matemático de la naturaleza misma como de la irrealidad de las cualidades. Galileo hizo mucho hincapié en ambas cuestiones repetidas veces. Galileo no dijo que los filósofos pudieran interpretar los datos *como si* el universo fuese matemático o cualitativo; muy al contrario, nos asegura, como también hace Kepler, que las relaciones y cantidades matemáticas son en realidad parte de la naturaleza misma. Podemos llamar a esto la postura pitagórica. Luego se hace evidente la insuficiencia de la lógica verbal como instrumento de la ciencia verdadera: la lógica matemática de la demostración es superior porque corresponde a la estructura real del universo. El filósofo cree acertadamente que los acontecimientos que tienen lugar en la naturaleza siguen una pauta lógica: pero se trata de la lógica del número.

Además, con el objeto de explicar por qué el universo era de esta clase, Kepler y muchos otros enseñaban que Dios mismo es un geómetra, no por necesidad, sino por elección (sería geométricamente factible, por ejemplo, distribuir en una pauta distinta los sólidos geométricos que definen a las orbes planetarias). Ésta es la postura platónica. Así, pues, la respuesta a la pregunta sobre cómo adquirió el universo su carácter material es: lo recibió del Intelecto Supremo. Si las partes y propiedades reales de la naturaleza física son matemáticas, es porque la mente de Dios piensa matemáticamente, y también así concibe las relaciones físicas.

Podríamos seguir este camino y aludir a la seguridad galileana de que la mente humana entiende la verdad de una proposición geométrica tan plenamente como la entiende la mente divina; o examinar la función de la deidad matemática en su universo después de la

1. E. A. Burtt, *The metaphysical foundations of modern physical science*, Routledge, Londres, 1949 [1924], p. 16.

creación del mismo; o considerar las interrelaciones del espacio, la materia y el número, que son muy difíciles. ¿Pueden el espacio o la materia ser divididos infinitamente? ¿Puede la mente humana comprender, de hecho, el concepto de infinitud, que es esencial para las matemáticas? Todas estas preguntas fueron trascendentales para la ciencia del siglo XVII y los filósofos de dicho siglo discreparon de sus predecesores en lo referente a todas ellas.

En el presente capítulo daremos por sentado este importante substrato del cambio intelectual. Los propios científicos no se muestran siempre muy autoanalíticos a este respecto: cuando Boyle escribió: «Un conocimiento competente de matemáticas es tan necesario para un filósofo que no vacilo en afirmar que cosas más grandes cabe esperar aún de la física, porque los que pasan por naturalistas han sido generalmente ignorantes de esta disciplina», lo que hacía (probablemente) no era tanto abogar por una postura metafísica o epistemológica concreta como hacer un comentario racional acerca de la interpretación de los datos experimentales y de otra índole. El descubrimiento de la ley de Boyle así lo demuestra. Pero la única cosa necesaria no era que, como dijo él, el naturalista dominase las matemáticas, sino que también debía tener acceso a un tipo de matemáticas que fuera útil. La geometría de los griegos había sido suficiente para la elipse de Kepler y la parábola de Galileo, pero a finales de siglo se necesitarían métodos nuevos, más poderosos. Aunque gran parte de los *Principia* de Newton estaban dentro del molde clásico que él adoptó deliberadamente para ellos, no ocurría así con algunos de los razonamientos más importantes, y con el citado libro la física avanzada se colocó para siempre fuera del alcance de las personas que no entienden de matemáticas.

Antes del siglo XIX sólo unas cuantas ramas de la ciencia podían emplear las matemáticas de un modo interesante: principalmente, las diversas ramas de la mecánica, la óptica y la astronomía. Eran más frecuentes, desde luego, las aplicaciones sencillas de las matemáticas, por ejemplo, el empleo de proporciones en la teoría musical, que en dicho siglo se estaba extendiendo en su parte experimental y se convertiría en la ciencia de la acústica. Más interesantes son los estudios de los modelos de teselas que realizó Kepler como ramal de su física celeste, y también la construcción hipotética por parte de Kepler del cristal de nieve a partir de esferas muy apretadas unas contra otras, idea que recogió Hooke (1665). De ello no nacieron temas de trabajo.

Pero en lo que se refiere a la mecánica y la astronomía, cabe decir que los grandes logros que caracterizaron a la revolución científica hubiesen sido imposibles sin el enorme avance que tuvo lugar en las matemáticas puras y que, en cierta medida, fue inspirada por la comprensión de su carácter. Casi todos los grandes matemáticos de los siglos XVI y XVII, de Tartaglia y Stevin a Cavalieri, Descartes, Newton y Leibniz, se interesaron, al menos en parte, por las ciencias físicas. Uno de los descubrimientos inesperados de la época fue que cierto número de curvas matemáticas regulares (algunas conocidas desde hacía mucho tiempo), tales como la elipse, la parábola y la cicloide, o las funciones algebraicas que Descartes asociaba con tales curvas, aparecían en las investigaciones del astrónomo y del físico, de tal modo que su estudio tenía un doble interés. Los cálculos efectuados por el científico físico solían requerir el cálculo de una superficie limitada por una curva de algún tipo y, por lo tanto, estimulaba a su vez a investigar el funcionamiento de la integración, que fue tal vez donde se apuntaron sus mayores éxitos los matemáticos del siglo XVII. Varios de los avances del método los denotó por primera vez la solución de algún problema de mecánica, parte de la física, que a partir de 1650 ofreció una oportunidad sumamente provechosa de desplegar la inventiva matemática, que antes se dedicaba más a menudo a mejorar los procedimientos matemáticos en astronomía.

El progreso que hicieron las matemáticas en el siglo XVII puede verse muy fácilmente si se tiene en cuenta que alrededor de 1600 su forma resultaba aún apenas inteligible para los ojos modernos.[2] De hecho, la escritura de los números arábigos a la manera moderna estaba casi estabilizada, pero seguían usándose los números romanos, especialmente en contabilidad. El uso de los símbolos modernos para operaciones sencillas como multiplicar, dividir, sumar, etcétera, no se normalizó hasta la segunda mitad del siglo XVII. Anteriormente los argumentos matemáticos se exponían de una forma retórica, difusa. La notación algebraica se resolvió más o menos en la misma época; la costumbre de emplear letras para las cantidades desconocidas o indeterminadas la había introducido el matemático francés Viète poco antes de 1600. Las operaciones aritméticas, en especial las que llevaban aparejadas divisiones largas o quebrados, seguían

2. Para las matemáticas del siglo XVII en general, véase D. T. Whiteside, «Patterns of mathematical thought in the later seventeenth century», en *Archive for History of Exact Sciences*, 1 (1961), pp. 179-388.

ejecutándose por medio de métodos engorrosos, y «contar con la pluma» (en vez de utilizar el ábaco u otro procedimiento) seguía considerándose como un arte algo avanzado. Uno de los primeros aparatos calculadores, el denominado «los huesos de Napier», se creó para obviar la necesidad de aprenderse de memoria las tablas de multiplicar y la tarea de manejar largas filas de cifras. Por otra parte, a un nivel superior, las tablas de funciones eran muy deficientes. En trigonometría los griegos sólo conocían tablas de cuerdas; durante la baja Edad Media se idearon las tablas de senos y tangentes y en el siglo XVI se tabularon otras funciones trigonométricas. Pero tanto los métodos de computar las tablas como los de usarlas eran muy tediosos. De un intento de hacer más fáciles los cálculos que llevaran aparejadas estas funciones nació el invento de los logaritmos, tal vez el descubrimiento matemático de mayor utilidad universal que se hizo en el siglo XVII y, de ello no cabe duda, el menos esperado. Las tablas de Napier (*Mirifici logarithmorum canonis descriptio*), publicadas en 1614, dan logaritmos de senos que en realidad son potencias de base e^{-1}, la recíproca de la base de los modernos logaritmos en base 10 para los primeros mil números. Los logaritmos brindaban un ejemplo convincente de la utilidad del sistema decimal de fracciones, por el cual Stevin había abogado con mucha energía unos treinta años antes.

Es curioso que el mecanicismo predominante del pensamiento del siglo XVII gobernase el descubrimiento matemático de Napier, porque éste definió el logaritmo como una longitud lineal determinada por los distintos movimientos continuos de dos puntos; «suponía conceptos de tiempo, movimiento y velocidad instantánea».[3] Isaac Barrow (1630-1677), matemático de Cambridge y antiguo protector de Newton, volvió un poco al mismo procedimiento; de hecho, la única deuda con Barrow que Newton reconocería es que «tal vez me hizo pensar en la generación de cifras por movimiento, aunque ahora no lo recuerdo». En octubre de 1666 Newton prepararía un tratado (inédito) titulado «Para resolver problemas mediante el movimiento estas proporciones siguientes son suficientes», tratado que señalaría una etapa importante de la evolución de su método de *fluxiones* o cantidades fluidas formadas por el movimiento de un punto o una línea. A la inversa, las primeras aplicaciones de las fluxio-

3. Margaret E. Baron en *DSB*, IX, 611 (2).

nes (o diferenciales) se hicieron en gran parte a los problemas de la mecánica.

Como los griegos ya sobresalían en geometría y trigonometría, lo que se hizo en 1600 fue poco más que asimilar, con leves ampliaciones, los métodos griegos a estas ramas de las matemáticas. Los eruditos del Renacimiento se habían dedicado a recuperar la tradición clásica pura en este y en otros campos del saber, con el resultado de que los textos disponibles, sobre todo los que describían los estudios más avanzados que hicieran los griegos del análisis geométrico y las secciones cónicas, eran mucho más completos a mediados del siglo XVI que antes. Al menos en este campo la erudición pura provocó un aumento inmediato del nivel de competencia. Ni siquiera a mediados del siglo XVII parecía absurda la práctica de «restaurar» una obra perdida o fragmentaria utilizando los métodos que seguramente había empleado el autor en la antigüedad, y cuando Newton escribió los *Principia* la geometría sintética de los griegos todavía era considerada como una forma de demostración matemática más segura que el método analítico creado recientemente.

El álgebra, en cambio, representa una creación europea a partir de fuentes hindúes e islámicas que los traductores medievales dieron a conocer a los latinos. El considerable progreso del siglo XVI, por ejemplo en la solución de ecuaciones de potencias superiores a la cuadrática, no se vio afectado por influencias humanísticas; de hecho, los procedimientos geométricos griegos para resolver ecuaciones fueron suplantados por métodos algebraicos. Las operaciones con proporciones y series, que los griegos también conocían sólo en la expresión geométrica, fueron convertidas de modo parecido en una forma aritmética o algebraica más conveniente.

No es éste lugar apropiado para trazar siquiera las líneas generales de la evolución de las matemáticas puras en el siglo XVII, pero como mínimo hay que llamar la atención sobre la existencia de dos líneas principales de actividad. La primera, que, como todo el mundo sabe, estaba vinculada a la *Geometrie* (1637) de Descartes, fue la introducción de lo que se daría en llamar «geometría analítica», esto es, la identificación de cantidades en una figura geométrica (que representaba el problema que había que resolver) con cantidades algebraicas a partir de las cuales se pueda formar una ecuación. O, como dice el propio Descartes,

si se desea resolver algún problema, primero se considera como resuelto, etiquetando todas las líneas que parecen necesarias para su construcción, tanto las que son conocidas como las que son desconocidas. Luego, sin hacer ninguna distinción entre las líneas conocidas y las desconocidas, uno debe exponer el problema siguiendo el orden que entre todos los demás muestre con mayor naturalidad cómo las líneas están mutuamente relacionadas unas con otras, hasta que se haya encontrado un medio de expresar una cantidad de dos maneras diferentes, a la cual se llama ecuación porque los términos de una de estas dos expresiones son iguales a los de la otra.[4]

Aunque durante mucho tiempo los matemáticos más conservadores (Huygens, Barrow y Newton entre ellos) considerarían la geometría analítica como simplemente una herramienta útil, un medio de descubrir pero no un medio de demostrar, su importancia en la primera de las dos capacidades era enorme, y transformó por completo el ritmo de descubrimientos matemáticos. En especial hizo crecer inmensamente la utilidad de las matemáticas en los problemas de la mecánica.

La segunda línea de actividad fue la invención de las cantidades infinitesimales. En este caso el punto decisivo fue la publicación por Bonaventura Cavalieri (1598-1647) de su *Geometria* (1635), obra surgida del impulso a crear de nuevo el método de descubrimiento empleado por Arquímedes y, por vez primera, una sistematización del método de los indivisibles.[5] Torricelli la llamó «el camino real a través del zarzal matemático, un camino que Cavalieri fue el primero en abrir para el público». El más conocido de sus sucesores fue John Wallis (1616-1703), profesor en Oxford durante mucho tiempo, cuya *Arithmetica infinitorum* (1656) fue cuidadosamente anotada por Newton; en estas anotaciones, según ha comentado D. T. Whiteside, «no hay una verdadera línea divisoria entre la sensación resumida del original y la subsiguiente oleada de nuevas ideas que se convirtieron en objetos de investigación original».[6] En New-

4. *Geometrie*, 1637, p. 300.
5. Cavalieri, al igual que su maestro Benedetto Castelli, era un religioso; Castelli había sido discípulo y amigo de Galileo; Cavalieri también se consideraba como tal. Fue el primero en publicar la trayectoria parabólica.
6. D. T. Whiteside, *Mathematical papers of Isaac Newton*, I, Cambridge U. P., Cambridge, 1967, p. 11.

ton, que hizo un estudio concienzudo de la *Geometrie* de Descartes y de otros matemáticos de su escuela tal como la publicó Frans van Schooten, las dos líneas de actividad se casarían y crearían los conceptos de su método de fluxiones o *calculus*. Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), cuyo *calculus* diferencial vería la luz (1684) antes que las fluxiones de Newton, aunque su descubrimiento fue posterior al de las fluxiones, llegó a la existencia por una ruta distinta, utilizando, por ejemplo, la obra aritmética de Pascal que, a mediados del decenio de 1660, era desconocida por Newton.

Un comentario tan breve como éste es muy injusto porque pasa por alto las realizaciones de otros matemáticos de gran fertilidad, tanto de la generación inmediatamente anterior a la de Leibniz y Newton —por ejemplo, Pierre de Fermat (1601-1665), corresponsal (a través de Mersenne) y rival de Descartes— como contemporáneos —por ejemplo, James Gregory (1638-1675), cuyas innovaciones en método fueron tan a menudo paralelas a las de Newton—.

La transformación de las matemáticas —aunque no quedó completada hasta alrededor de 1720, momento en que la totalidad de la mecánica había sido replanteada en el lenguaje del *calculus* mediante los esfuerzos conjuntos de Pierre Varignon (1654-1722), de la Academia de Ciencias de París, y de los hermanos Jakob y Johann Bernoulli— dio a la física matemática una sutileza y una riqueza sin precedentes. Los primeros pasos en la nueva dirección, sin embargo, en *Snowflake* (1611) de Kepler o *Dioptrique* y *Meteores* (1637) de Descartes, fueron bastante sencillos. El estudio moderno de la geometría de las lentes había empezado en *Dioptrice* (1611) de Kepler, que no sólo explicaba cómo el telescopio holandés daba una imagen ampliada, sino que, además, proponía un nuevo telescopio astronómico dotado de dos lentes convexas. Descartes llevó el tratamiento básico de la refracción mucho más lejos basándose en la ley de Snel, que le permitía computar, por ejemplo, la anchura de los arcos así como su diámetro basándose en dos refracciones y un reflejo único o doble en la gota de lluvia. (Quedó para Newton la tarea de explicar la coloración por medio de la descomposición.) Descartes recurre a un argumento muy ingenioso para demostrar cómo la luz que cae uniformemente en rayos paralelos sobre la gota se concentra en bandas después de la refracción y la reflexión. La sutileza de la óptica geométrica fue llevada mucho más lejos por Barrow (1669) y por

Newton en sus *Optical lectures*, que permanecerían inéditas hasta 1728.

Aunque sus experimentos relativos a la luz habían permitido descubrir que el color tiene una connotación matemática, además de dar otros muchos resultados cuantitativos obtenidos con precisión consumada, Newton no pudo formular una teoría matemática general de la luz y su transmisión. Tal vez su aproximación más afortunada a tal teoría parte de las ideas expresadas en la cuestión 29 de *Opticks*:

> ¿No son los rayos de luz cuerpos muy pequeños emitidos por las sustancias luminosas? Las sustancias pelúcidas actúan sobre los rayos de luz a distancia al refractarlas, reflejarlas y someterlas a inflexión, y los rayos agitan mutuamente las partes de esas sustancias a distancia para calentarlas, y esta acción y reacción a distancia se parece mucho a una fuerza atractiva entre cuerpos.

En los *Principia* un grupo de proposiciones explora la hipótesis como un aspecto de la teoría general de las fuerzas atractivas, suponiendo que las partículas de luz se aceleran positiva o negativamente después de pasar a través de una zona interfacial: rinden las condiciones ópticas ordinarias, incluyendo la ley de Snel, y Newton adaptó de la misma manera lo que él interpretaba como los fenómenos de la difracción. No obstante, en las *Cuestiones* también escribió: «Nada más se requiere para producir toda la variedad de colores, y grados de refrangibilidad, que el que los rayos de luz sean cuerpos de diferentes tamaños, el menor de los cuales puede hacer violeta ...», lo cual no dará resultado, al menos de acuerdo con la suposición gravitacional normal de que la fuerza entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas, toda vez que los corpúsculos de luz grandes y pequeños se aceleran igualmente y no habrá ninguna dispersión. Newton nunca encontró el camino para salir de este punto muerto y, por ende, en lo que se refiere a una teoría matemática de la luz en términos de fuerza sólo dejó el bosquejo insatisfactorio que aparece en los *Principia*.[7]

Christiaan Huygens tuvo más éxito, hasta el punto de que su obra (que también era sólo una parte de un esfuerzo más amplio) ha sido

7. *Principia*, libro I, Props. 94-98. *Opticks*, reedición de 1934, cuestión 29, 370, 372. A. R. Hall en R. Taton, ed., *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978, pp. 188-189.

admirada y reproducida hasta hoy. Aparece en su *Traité de la lumière* (1690), bosquejado ya en 1673 (el período de su polémica con Newton). Al igual que Hooke, Huygens partió de la suposición de que había una analogía entre luz y sonido, arguyendo que la luz es un movimiento de las partículas de éter irradiadas hacia fuera desde su origen. Aunque en algunos aspectos el análisis que hizo Huygens de la pulsación —o movimiento ondulatorio longitudinal era menos satisfactorio que la teoría matemática de las ondas de sonido que formuló Newton en los *Principia*, le permitió explicar, mediante el «principio de Huygens» de la formación del frente de onda móvil, cómo las pulsaciones podrían viajar a través de una abertura con el objeto de producir un rayo rectilíneo, porque fuera del rayo las ondas individuales «no concurren en el mismo instante para componer una onda que termine el movimiento, como hacen precisamente en la circunferencia que es su tangente común». También triunfó en la tarea, mucho más difícil, que, de hecho, derrotó siempre a Newton incluso cuando tenía ante sí el ejemplo de Huygens, de explicar los rayos gemelos de doble refracción en términos de su propia teoría. No obstante, habría que señalar una limitación que acentúa el carácter puramente matemático de la teoría ondulatoria de Huygens: solamente considera el movimiento de una única onda o pulsación en expansión, y no puede hacerse extensiva al caso, físicamente apropiado, de una cadena o sucesión de ondas periódicas.[8]

En vista de las profundas diferencias, tanto filosóficas como técnicas, entre los dos grandes físicos matemáticos del siglo XVII, difícilmente nos sorprenderá que la teoría de la luz siguiera siendo objeto de debates hasta el triunfo de la teoría ondulatoria transversal de Young y Fresnel. Es cierto que la influencia de Newton a partir de 1720 más o menos entrañaba una aceptación generalizada de su teoría de las partículas o emisión, que desde el punto de vista filosófico era más plausible además de llevar el sello de aprobación de Newton; pero algunos matemáticos continentales muy influyentes, en especial Leonhard Euler (1707-1783), continuaron defendiendo la teoría ondulatoria que siempre fue más fuerte que la de Newton en su formulación matemática. Curiosamente, el primer obstáculo real a la rectitud autoritaria de Newton en esta cuestión procedería de

8. A. E. Shapiro en H. J. M. Bos y otros, eds., *Studies on Christiaan Huygens*, Swets and Zeitlinger, Lisse, 1980, pp. 200-220.

los experimentadores newtonianos ingleses, al descubrir éstos que Newton estaba equivocado en su aparente confianza en que la dispersión (para cualquier color) es siempre proporcional a la refracción. Su descubrimiento (1759) hizo que las lentes acromáticas fueran posibles.

La mayor debilidad de la filosofía de la naturaleza propuesta por Descartes residía en su tratamiento de la luz, que no podía enfrentarse a Huygens. A partir de 1712, de hecho, el filósofo Malebranche adoptó la teoría newtoniana, prefiriéndola incluso a Huygens, en su *Recherche de la vérité*. La antítesis entre la base dinámica de las proposiciones «ópticas» de Newton en los *Principia* y la base cinemática de la teoría cartesiana, defendida por Huygens, fue el tema fundamental de la ciencia matemática en general durante el período correspondiente a los últimos años de Newton. ¿Debía el filósofo defender, al igual que Descartes, la tesis de que el movimiento incesante era inherente a la naturaleza, para poder postular así con libertad cualquier condición inicial del movimiento que le apeteciese, sin estar obligado más que a estudiar su transmisión y su modificación? ¿O debía, tal como insistía Newton, creer que en la naturaleza actúan fuerzas que confieren, modifican o detienen los movimientos de los cuerpos? ¿A esta segunda filosofía, que no alcanzaba a explicar el origen ni el modo de actuación de las fuerzas, podía llamársela apropiadamente «filosofía mecanicista»? Por supuesto, nadie dudaba que «fuerza» es una expresión propiamente mecánica, como, por ejemplo, cuando se dice que la presión del aire ejerce fuerza sobre un pistón, o cuando un cuerpo que se mueve velozmente ejerce fuerza al chocar con otros; en su sentido más árido, la diferencia de opinión giraba en torno a si *todas* las fuerzas deben ser reducibles al choque de partícula sobre partícula, o si también es apropiado hablar de las fuerzas como causas dinámicas que producen efectos de movimiento, sin hacer ninguna suposición relativa al choque. El propio Newton se mostró siempre categóricamente cauto en la defensa de una postura agnóstica, esto es, en los contextos matemáticos declaraba formalmente que creía en la existencia de fuerzas, al mismo tiempo que decía ignorar si era o no posible reducir a su vez las fuerzas postuladas (gravedad, magnetismo, etcétera) a procesos de choque, imaginando, por ejemplo, algún tipo de éter impulsor. Así, en los *Principia* Newton excusa su repetición constante de la palabra «atracción»:

> Porque las atracciones son generalmente hacia cuerpos ... Razón por la cual procedo ahora a explicar el movimiento de cuerpos que se atraen mutuamente, considerando las fuerzas centrípetas como atracciones aunque quizá si usamos el lenguaje de la física podamos llamarlas más verdaderamente impulsos. Pero ahora nos estamos ocupando de matemáticas y por ello empleamos el habla ordinaria, dejando a un lado los argumentos físicos, con el fin de ser entendidos más fácilmente por los lectores matemáticos.[9]

Aunque no podemos estar seguros de si los lectores de 1687 decían o no normalmente que el Sol atraía a la Tierra, o la Luna al mar, lo cierto es que a ningún crítico de Newton se le disuadió jamás de atacarle por ser el padre de las fuerzas atractivas mediante este ejemplo de juegos de manos y otros de la misma clase. En las cuestiones de *Opticks*, aunque con espíritu pretendidamente conjetural, Newton parece revelar de modo más abierto su verdadera comprensión de la naturaleza de las cosas al preguntar:

> ¿No tienen las pequeñas partículas de los cuerpos ciertos poderes, virtudes o fuerzas, por medio de las cuales actúan a distancia, no sólo sobre los rayos de luz para reflejarlos, refractarlos y someterlos a inflexión, sino también unas sobre otras para producir una gran parte de los fenómenos de la naturaleza? [10]

Este pasaje puede emparejarse con el que se publicó mucho antes en el prefacio de los *Principia*, donde Newton, tras hablar de las fuerzas de las que había deducido los movimientos de los planetas, cometas, la Luna y el mar, continuaba diciendo

> Desearía que pudiéramos derivar el resto de los fenómenos de la naturaleza mediante la misma clase [matemática] de razonamientos partiendo de principios mecánicos, pues muchas razones me inducen a sospechar que puede que todos ellos dependan de ciertas fuerzas por medio de las cuales las partículas de los cuerpos, por algunas causas hasta ahora desconocidas, o bien son mutuamente impulsadas unas hacia otras, y forman figuras regulares, o son repelidas y se apartan unas de otras.

9. *Principia*, libro I, Introducción a la sección XI.
10. *Opticks*, cuestión 31.

Si generalizamos de lo macroscópico a lo microscópico, como justifica que hagamos la quinta regla de razonamiento de los *Principia*, entonces Newton nos invita a percibir una sencilla pauta básica en la naturaleza, una pauta formada por los movimientos de partículas (y cuerpos brutos) ocasionados esencialmente por fuerzas interparticulares, tanto atractivas como repulsivas.

Ahora bien, no es difícil creer que cada partícula afecte a las demás de múltiples maneras, de tal modo que si una fuera aniquilada, el resto del universo sentiría, en principio, la pérdida. Es mucho más difícil creer que el universo esté construido de tal forma que, desde fuera, hace de cada partícula de materia el centro de múltiples fuerzas. El newtonianismo basado en la fuerza atractiva y repulsiva resultaba inteligible para un Huygens o un Leibniz, aunque ellos se negaran a creerlo; un universo cinemático newtoniano es sencillamente incomprensible. No es extraño que los contemporáneos de Newton, ya fueran partidarios o contrarios a él, creyesen que interpretaba como físicamente reales los centros de fuerza atractiva de los que hablaba tan a menudo.

Este estudio de la aparición de la idea newtoniana de la fuerza como algo antológicamente real, y puede que incluso como un absoluto, igual que la materia misma, ha sido necesario porque en su tiempo una idea que a nosotros nos parece tan familiar fue una novedad. A principios del siglo XVII la palabra «fuerza» (en sus acepciones técnicas) no tenía otro significado que el mecánico: una prensa de husillo ejerce fuerza sobre un fardo. E. A. Burtt, en su admirable libro *The metaphysical foundations of modern physical science*, dice que a Galileo le interesaban primordialmente los movimientos acelerados «y éstos siempre presuponen ... alguna fuerza o fuerzas como causa».

> Por consiguiente, la causa de todo movimiento que no sea sencillo y uniforme debe expresarse en términos de *fuerza*.[11]

Este punto de vista es natural, pero no está justificado por la historia. Galileo no sólo no tenía ningún concepto matemático de «fuerza» como nombre que se daba al producto formado por la multiplicación de la masa y la aceleración de un cuerpo, sino que también carecía

11. E. A. Burtt, *The metaphysical foundations of modern physical science*, Routledge, Londres, 1949 [1924], p. 89.

de un concepto ontológico de «fuerza» como nombre de un agente activo y conservador del universo. Conoce únicamente una sola fuerza ontológica, la gravedad, que él no denomina «fuerza», aunque habla con naturalidad de la fuerza de los proyectiles. Por lo tanto, no puede ni mucho menos ver la aceleración constante como un efecto, la fuerza constante como su única causa; en el pasaje de las *Consideraciones y demostraciones* donde niega que le interese determinar la causa de la aceleración natural uniforme no sugiere que dicha causa sea una fuerza y que ésta se llame «gravedad». De hecho, dado que la gravedad es natural, Galileo hubiera obrado indebidamente de haberla clasificado como fuerza.[12]

Si es inútil buscar en Galileo una idea generalizada de la fuerza, aún es menos de esperar encontrarla en Descartes, aunque (al igual que Galileo) utiliza la palabra para analizar la acción de las máquinas y (matizando) como sinónimo de *momentum*. Para Descartes el problema de la fuerza en la mecánica se convirtió en un problema de causa mecánica, ya que en su sistema se explicaba específicamente toda clase de movimiento atribuyendo su producción al movimiento impulsor de las partículas. De aquí que Descartes nunca pudiera estar de acuerdo con Galileo aunque inicie sus comentarios sobre *Consideraciones y demostraciones* (1638) de Galileo con el siguiente elogio melifluo:

> Encuentro en general que filosofa mucho mejor que la persona corriente, por cuanto abandona en la medida de lo posible los errores de las Escuelas, y trata de examinar las cuestiones físicas por medio de razonamientos matemáticos. En eso estoy totalmente de acuerdo con él, y pienso que no hay ningún otro medio de averiguar la verdad.

Esta aspiración no la cumpliría nunca Descartes en su propia filosofía de la naturaleza, que se publicaría seis años más tarde. Pero, para concretar más: «Todo lo que dice [Galileo] acerca de la velocidad de los cuerpos que caen a través del vacío está construido sin cimientos, pues en primer lugar debiera haber determinado qué es el peso, y si hubiese conocido la verdad, hubiera sabido que es cero en el

12. Galileo Galilei, *Two new sciences*, trad. de Stillman Drake, Wisconsin University Press, Madison y Londres, 1974, p. 159; compárese R. S. Westfall, *Force in Newton's physics*, Cambridge U. P., Londres y Nueva York, 1971, pp. 7-8, 40-41.

vacío».[13] Obviamente, en este pasaje la palabra «vacío» tiene un significado equívoco; Galileo se refería a un espacio que estuviese libre de una atmósfera que ofreciera resistencia al movimiento, mientras que Descartes lo interpreta como un espacio del que están excluidas las partículas impulsoras que causan la caída de los cuerpos, por lo que no puede haber ningún «peso». Así, Descartes, siguiendo la causalidad a la que Galileo había renunciado, se aisló de la tradición galileana de analizar en términos matemáticos los conceptos de aceleración y velocidad. Por otro lado, su sistema hacía hincapié en la importancia de las leyes del choque que gobernaban el intercambio de movimento. La combinación de las dos primeras Leyes del Movimiento de Descartes, tal como las exponen sus *Principia philosophae* (1644), formaría la primera de las Leyes del Movimiento de Newton. Antes que Descartes, Galileo también había tratado de formular una teoría general del choque, pero sin obtener resultados concretos; el filósofo francés expresaba sus reglas cuantitativamente, pero, después de las tres primeras, son todas falsas. Él mismo reconocía que no se ajustaban a la experiencia, en parte porque Descartes tenía unas ideas totalmente confusas en lo relativo al efecto del tamaño en el choque de los cuerpos.

Si el funcionamiento del mundo dependía de tales fenómenos, la situación era absurda. En 1668 la Royal Society pidió a tres de sus miembros que estudiaran la cuestión e informaran de sus conclusiones. John Wallis se ocupó sólo del choque inelástico: afirmó correctamente que —teniendo en cuenta la dirección— la suma de los momenta (la velocidad multiplicada por el peso) son las mismas antes y después del choque, y expuso el caso con acierto. Huygens y Wren, por otro lado, estudiaron el choque perfectamente elástico y también expusieron los casos correctamente; Wren formuló sus argumentos a partir de un postulado más bien extraño: el de un equilibrio dinámico; Huygens (examinando toda la cuestión de forma más explícita) expresó exactamente los principios dinámicos generales: 1) la suma de las energías cinemáticas antes y después del choque es la misma, 2) la velocidad del centro de gravedad de los dos cuerpos tampoco sufre variación.[14] Así se averiguaron las «leyes del movi-

13. Descartes a Mersenne, 11 de octubre de 1638; Ch. Adam & Paul Tannery, *Oeuvres de Descartes*, reedición París, 1975, II, pp. 380, 385.

14. Huygens no utilizaba las palabras «energía cinética» ni siquiera «*vis viva*» (introducidas más adelante por Leibniz), pero el sentido está claro. Véase R. Dugas,

miento» (a la sazón tan dominadas), aunque perfectamente inútiles en cualquier tipo de teoría física. Es interesante que en fecha tan avanzada, y sin perjudicar sus conclusiones últimas, Wallis pudiera elegir lo siguiente como segundo postulado: «si una fuerza *V* mueve un peso *P*, una fuerza *nV* moverá *nP*, si no cambian las circunstancias, esto es, a través de la misma distancia en el mismo tiempo, o con la misma velocidad». ¡Se trata de un principio perfectamente aristotélico!

Al invitar a Huygens a comunicar sus ideas sobre la colisión, Oldenburg supuesto que existía en Londres la creencia de que Huygens «ya había descubierto una teoría que explicaba toda clase de fenómenos relacionados con el movimiento», y en respuesta Huygens preguntó qué clase de movimiento deseaba la Royal Society que comentara. «Pues hay varias clases, la mayoría de las cuales creo que he considerado: esto es, la proporción de la caída de cuerpos pesados, tanto con la resistencia del aire como sin ella; el movimiento de los péndulos; los centros de oscilación; el movimiento circular y cónico y la fuerza centrífuga; la comunicación del movimiento por choque.» [15] Aunque sólo una parte de toda esta obra sobre mecánica se publicaría en vida suya (en *Horologium oscillatorium*, 1673), Huygens fue la principal autoridad en materia de matemáticas aplicadas antes de Newton. Su determinación de la magnitud de la fuerza centrífuga se remontaba a 1659; su fundamental estudio teórico del péndulo sencillo, compuesto y cónico, a 1657. Estimulado igualmente en sus primeros estudios por Galileo y Descartes, Huygens justificaría más tarde la brillante promesa de su juventud (la elucidación de los anillos de Saturno), puede que con la edad tendiendo más a la metodología de Galileo, ya que, como él mismo relata:

> M. Descartes había encontrado la forma de hacer que sus conjeturas y ficciones se aceptasen como verdades. Y a los lectores de sus *Principia philosophae* les sucedía algo muy parecido a lo que les ocurría a los que leen novelas que agradan y crean la impresión de ser narraciones verídicas. A mí me pareció cuando leí por primera vez este libro de los *Principia* [teniendo entonces 15 o 16

La mécanique au XVIIe siècle, Dunod, París, 1954, pp. 287-293. Todos los documentos se incluyen en Hall y Hall, *Correspondence of Oldenburg*, V, University of Wisconsin Press, Madison y Londres, 1968.

15. *Oldenburg*, pp. 104, 127.

> años] que todo lo que en él había era espléndido y sentía, al encontrar alguna dificultad, que la culpa era mía por no entender debidamente el pensamiento de Descartes. Pero desde entonces, habiendo descubierto de vez en cuando algunas cosas que obviamente son falsas en ese libro, y otras sumamente improbables, me he recuperado mucho del enamoramiento que sentía por él.[16]

También Pascal dijo que *Principia philosophae* era una novela de física. Pero, aunque renunciara a los errores y absurdos demostrables de Descartes, Huygens distó mucho de perder la fe en el principio del universo plenístico y cinemático que era fundamental en la filosofía cartesiana de la naturaleza, prefiriéndolo en gran medida al principio de las fuerzas atractivas y repulsivas que más adelante encontró en los *Principia* de Newton, por mucho que admirase la matematización de la física efectuada por Newton. Podemos sentir simpatía por el conservadurismo de Huygens en este sentido, por cuanto no cabe ninguna duda de que la física de Newton creó problemas de carácter profundo (¿Cuál es el origen de las fuerzas? ¿Cuál es la causa de la gravedad?) que él no pudo resolver y que nunca serían resueltos porque definen los límites de esa física, pero igualmente —y con consecuencias peores, ya que obstruyó la evolución— Huygens se encontraba atrapado, al igual que todos los neocartesianos, en una disparidad entre el microcosmos y el macrocosmos. En el nivel macrocósmico Huygens hizo avances importantes y colocó la teoría del movimiento sobre una base más sólida, y sabía que *si* las leyes y los métodos de la mecánica eran generales, tan aplicables a partículas fundamentales como a bolas de billar, entonces se conseguiría una unidad de explicación:

> ... si la naturaleza en conjunto consiste en ciertos corpúsculos, de cuyos movimientos surge toda diversidad de cosas ... como muchos filósofos creen probable, entonces representará no poca ayuda para reflexionar sobre esto si las verdaderas leyes del movimiento fueran descubiertas, y si se supiera cómo se transfiere el movimiento entre cuerpos.[17]

16. *Oeuvres complètes*, X, p. 403. Citado en Dugas, *op. cit.*, pp. 284-285.
17. Alan Gabbey en Bos y otros, eds., (en nota 8), pp. 166-199; cita de *Oeuvres complètes*, XVI, 150 en p. 189, y en Westfall, *op. cit.* (en nota 12), p. 147.

Esto lo escribió en 1656; pero durante todo el resto de su vida Huygens no logró encontrar el camino para ir de la mecánica teórica a la física experimental. Este camino lo hallaría Newton. Es cierto que pocas veces logró penetrar Newton hasta el nivel microscópico para demostrar la congruencia con el macroscópico, pero estas veces fueron decisivas, y su concepto fundamental —que las partículas esenciales de la materia ejercen fuerzas unas sobre otras— ha sido desde su época hasta la nuestra el principio del que parte la explicación científica, aunque las fuerzas ya no sean newtonianas.

Así, pues, a la postre Huygens, como Leibniz después de él, no consiguió liberarse de aquellos grilletes metafísicos que era la preocupación cartesiana por la causalidad mecanicista, y sus logros en la matematización de la naturaleza permanecerían desconectados e incompletos: cuando los problemas se hicieron realmente profundos, Huygens volvió a refugiarse en las conjeturas etéreas de los *Principia* de Descartes. Según Westfall, en este análisis formal de la mecánica, Huygens atenuó de modo parecido, a lo largo de los años, el contenido dinámico de sus investigaciones a favor de la pureza de la cinemática:

> Huygens dirigió sus sospechas hacia el concepto mismo de fuerza por las tendencias ocultas que creía implícitas en él. Más aún que Galileo, trató de fundamentar la cinemática de los cuerpos pesados en el hecho, que debía aceptarse como dado empíricamente, de que los cuerpos pesados descienden con un movimiento que se acelera uniformemente.[18]

Coincidiendo en esto tanto con Galileo como con Descartes, la gravedad no debía considerarse como una fuerza, sino simplemente como su sinónimo lingüístico, el peso. La liberación de Huygens también se vio estorbada por las limitaciones de su imaginación matemática que hemos señalado anteriormente; la forma geométrica de pensar que le reportó ricas recompensas en la mecánica, e incluso le permitió crear sus propios métodos de integración, unos métodos de considerable poder (por ejemplo en su investigación del movimiento con fricción), le impidió encontrarle mérito a la elaboración ajena del cálculo infinitesimal.[19] Esto es muy evidente en sus inter-

18. Westfall, *loc. cit.*, pp. 161 ss.
19. Bos (en nota 8), p. 143.

cambios con Leibniz, Newton y Fatio de Duillier. Huygens sería siempre lo que su padre había dicho: el Arquímedes de esta nueva época.

Esta distinción es suficiente. A mediados del siglo XVII, período que destacó por tantos estudios excelentes en el campo de la mecánica —de Borelli, Hooke, Marci, Wren, Wallis, Fabri— a Huygens se le señala invariablemente como el único vínculo esencial entre Galileo y Newton, y fue uno de los pocos hombres a los que Newton elogió en público. Sus relaciones personales eran cordiales, aunque los dos hombres se encontraban en mundos distintos de la física. Siguiendo de cerca el estudio intensivo que varios matemáticos hicieron de la cicloide —una curva «mecánica» y la primera curva nueva que se dominaba desde la antigüedad—, Huygens había probado (1659) que el péndulo sencillo es sólo isócrono en sus oscilaciones si describe un arco cicloidal; además, que la evoluta de una cicloide es la misma cicloide. Así, confinando la suspensión flexible del péndulo entre «mejillas» cicloidales, el arco se transforma en una curva idéntica y quedó matemáticamente justificada la construcción del reloj de péndulo inventado por Huygens dos años antes; pero tal vez sea más importante el hecho de que Huygens idease el concepto matemático de la evoluta.[20] También resolvió el problema de determinar el centro de la oscilación (lo cual permitió comparar péndulos experimentales con el péndulo único ideal): «En cuanto a las vibraciones o centros de oscilación —escribió—, Roberval averiguó muy poco, es decir, el centro de oscilación del sector de un círculo. M. Descartes no hizo nada. Yo he realizado todo lo relacionado con esta cuestión, y di las demostraciones en mi tratado sobre el reloj [*Horologium oscillatorium*]».[21] La relación de la longitud con el período del péndulo y la fuerza gravitacional la explicó Huygens fácilmente y mediante ella determinó que el valor de g en París era de 981 cm/s^2 (en medida equivalente).

Varias corrientes, de las cuales no era la menor sus lecturas, llevaron a Huygens hacia la denominación y el descubrimiento que más fama le dieron: la fuerza centrífuga. También sobre ella escribió un tratado en 1659, aunque se publicaría póstumamente, en 1703,

20. En un breve espacio de tiempo, el escape de áncora, oscilando el péndulo del reloj a través de sólo unos grados, haría que la cicloide fuese mecánicamente superflua incluso en el cronómetro más perfecto.

21. *Oeuvres complètes*, X, p. 402, citado en Dugas (en nota 14), p. 319.

cuando ya no era significativo. Sus principales proposiciones las había expuesto sin pruebas en *Horologium oscillatorium*, de modo que desde 1673 Newton era consciente de que había ciertas analogías entre la labor de Huygens y la suya. Galileo no había podido demostrar por qué la rápida rotación de la Tierra no arroja los objetos como si fuera una honda; se habría limitado a decir que una revolución diaria no representa una rotación rápida. Descartes tampoco había tratado este problema cuantitativamente, aunque había explicado que la fuerza centrífuga» (empleando la denominación de Huygens fuera de lugar) es una manifestación de la inercia de un cuerpo. Aunque también afirmaba que un cuerpo suspendido en un fluido, como él imaginaba que estaba la Tierra, no se mueve porque no deja su ambiente inmediato, Descartes llamó la atención sobre la tendencia del planeta a alejarse del centro del vórtice en el cual es transportada y dispuesta una tendencia centrípeta, opuesta, en la materia del vórtice a retener el planeta en su órbita.

Huygens basaba sus argumentos en que la fuerza centrífuga es comparable con la gravedad, o más bien (y el detalle tiene cierta trascendencia) que el empeño (*conatus*) de un cuerpo por alejarse de un centro alrededor del cual gira es de la misma clase que el esfuerzo que realiza el cuerpo por aproximarse al centro de la Tierra. Las consideraciones geométricas demuestran que si el cuerpo pudiera escapar a lo largo del radio vector por medio del cual está atado al centro, atravesaría, en tiempos iguales y sucesivos, distancias crecientes según la serie de número impares, justamente como Galileo había demostrado en el caso de los cuerpos que caen. Examinando el efecto en círculos de radio diferente, o del mismo radio a los que se hiciera rodar con velocidades distintas, Huygens probó que el *conatus* equivale a v^2/r, o, específicamente, que el esfuerzo por alejarse del centro es igual al peso del cuerpo, cuando la velocidad periférica en el círculo es la misma que el cuerpo adquiriría al descender la mitad del radio ($v = \sqrt{gr}$). Así, el *conatus* incluso en el Ecuador es centenares de veces menor que la gravedad.

Hay un aspecto curioso, aunque muy conocido, del análisis de Huygens. Empezó postulando (como, de hecho, hiciera Galileo, y las hondas dependen de ello) que, si se le suelta súbitamente, el cuerpo que gira «sale volando por la tangente», la tangente del radio vector en el punto de separación. Su movimiento a lo largo de la tangente es, como expresó correctamente el propio Huygens, inercial

y uniforme. Su aceleración en relación con el antiguo centro de revolución es ilusoria, del mismo modo que un tren que se acerca por una vía recta parece acelerar si nos encontramos un poco a un lado, no hay ninguna fuerza dentro del cuerpo, o actuando sobre él, para acelerarlo desde el centro, como Huygens suponía y afirmaría siempre al hablar de fuerza «centrífuga». Por otro lado (como percibió Newton), tiene que haber una fuerza constante —la resistencia de un bramante, por ejemplo— una fuerza *centrípeta*, para retener el cuerpo en su círculo. Hay que imaginar que el cuerpo es acelerado constantemente *hacia dentro* desde la tangente (donde, por lo demás, estaría) hasta su posición en el círculo. Aunque Huygens dijo que el cuerpo que giraba «tenía empeño en retroceder en la dirección de su bramante con un movimiento acelerado», su único «empeño» es, de hecho, tangencial. La distinción de punto de vista es esencial para comprender el movimiento planetario.

Como neocartesiano, sus cuerpos celestes nadando en vórtices, Huygens nunca abordó la cuestión de la mecánica planetaria. Sin embargo, tras la publicación de los *Principios* de Descartes en 1644, los elementos brutos del problema quedaron completamente agrupados. El paso esencial —olvidando por el momento el carácter no circular de las órbitas y la falta de uniformidad de los movimientos de los planetas— consistía en reemplazar la presión centrípeta de Descartes en el vórtice por algún otro «empeño» de fuerza en el planeta dirigido hacia el Sol. Unos veinte años después de publicarse los *Principios*, tres hombres se ocuparon de este problema.

Pero antes de hablar de ellos, es necesario explicar el origen del concepto de fuerza atractiva celeste. Descartes lo había excluido enérgicamente; las supuestas atracciones y repulsiones de su sistema eran efectuadas en su totalidad por el impacto de materia sutil (o éter) sobre cuerpos sólidos. No se creía que en el vórtice celeste las posiciones de los planetas fueran totalmente arbitrarias, pero Descartes no había intentado ajustar a su filosofía las leyes que Kepler derivara de la observación, leyes que precisamente exponían la pauta planetaria. También había abandonado la idea de Copérnico, una idea algo vaga, según la cual la gravedad podía considerarse como un principio cohesivo universal, aunque específico, de la naturaleza. Sin embargo, una tradición diferente la había preservado. Gilbert había apelado a ella como causa de que los cuerpos conservasen su integridad. «Cohesión de las partes y agregación de la materia —había

escrito— existen en el Sol, en la Luna, en los planetas, en las estrellas fijas», de manera que en todos estos cuerpos las partes tienden a unirse al conjunto «con el cual se conectan con la misma apetencia que las cosas terrestres, a las que llamamos pesadas, con la Tierra».[22] Esto quiere decir que la gravitación es una propiedad universal de la materia, pero peculiar a cada cuerpo; la misma gravedad no es común a todos, a juicio de Gilbert, porque un pedazo de materia lunar tendería siempre hacia la Luna y nunca se adheriría a la Tierra.

Diríase que después de la afirmación galileana de que la materia de la Tierra, la Luna y los planetas —es decir, los cuerpos celestes no luminosos— era de la misma clase, iba a resultar sencillo argüir que toda esta materia terrestre compartía una atracción común, lo igual atrayendo a lo igual. Pero contra semejante argumento resultó doblemente eficaz la teleología de la teoría de la atracción, que en modo alguno era necesaria para explicar el comportamiento conocido de la materia lunar o solar, aparte de en cohesión. En primer lugar, si la materia de la Luna, por ejemplo, fuera atraída hacia la Tierra, la teoría no explicaría la cohesión de las partes de la Luna. En segundo lugar, una atracción gravitacional común sugeriría que toda la materia terrestre del universo se agruparía en una masa: éste era el punto de vista de Aristóteles, al que Galileo se oponía. En tercer lugar, Galileo y sus seguidores eran reacios a introducir en la astronomía el principio esotérico de la atracción, el cual transtornaría la perfecta revolución inercial de los cuerpos celestes. La teoría de las atracciones específicas continuó siendo mucho más plausible.

Esta teoría la había utilizado Gilbert, y Copérnico antes que él, como alternativa a la causalidad aristotélica de los movimientos de los cuerpos terrestres pesados. Tenía menos de nuevo principio cosmológico que de nuevo principio físico aplicado a la cosmología. Como tal también lo utiliza Kepler:

> Un punto matemático, sea o no el centro del Universo, no puede mover cuerpos pesados de manera eficaz y objetiva de modo que se aproximen a él mismo ... Es imposible que la forma de una piedra, moviendo su masa [*corpus*], buscase un punto matemático o el centro del mundo, exceptuando con respecto al cuerpo en el que dicho punto reside ... La gravedad es un afecto corpóreo mutuo

22. *On the magnet*, trad. de S. P. Thompson (Londres, 1900), Basic Books, Nueva York, 1958, pp. 219, 229.

entre cuerpos afines hacia su unión o conjunción (clase a la que pertenece también la facultad magnética), de manera que la Tierra atrae una piedra mucho más de lo que la piedra busca la Tierra. Suponiendo que la Tierra esté en el centro del Universo, los cuerpos pesados no serían transportados hacia el centro del Universo como tal, sino hacia el centro de un cuerpo esférico afín, es decir, la Tierra. Y así adondequiera que se suponga que la Tierra es transportada por su facultad animal, los cuerpos pesados tenderán siempre hacia ella.[23]

Hasta ahora Kepler no ha dicho nada nuevo. Ha repetido que el concepto de la atracción de lo igual hacia lo igual puede sustituir al concepto aristotélico según el cual la materia es atraída hacia lugares específicos, y han limitado su empleo de este concepto a los cuerpos pesados afines a la Tierra. Pero ha manifestado, por vez primera, que la atracción es mutua (la analogía entre gravedad y magnetismo, iniciada tan fructíferamente por Gilbert, es ampliada ahora), tema éste que amplió todavía más:

Si se colocaran dos piedras una cerca de la otra en cualquier lugar del Universo fuera de la esfera de virtud de un tercer cuerpo afín, como dos cuerpos magnéticos se juntarían en un punto intermedio, cada uno recorriendo tal distancia hacia el otro, como la masa del otro están en proporción a la suya propia.

Se introducía aquí un concepto original de la magnitud del movimiento debido a la atracción gravitacional ($d_1/d_2 = m_2/m_1$), en el cual estaba relacionado con la proporción de las masas de los dos cuerpos. Kepler, pues, empezó a investir la teoría de la atracción con una fuerza dinámica definida. Asimismo, postuló que la Tierra y la Luna eran materia afín, como las dos piedras:

Si la Luna y la Tierra no fueran retenidas cada una en su órbita por sus fuerzas animales u otras fuerzas equivalentes, la Tierra ascendería hacia la Luna una quincuagésima cuarta parte de la distancia entre ellas, y la Luna descendería hacia la Tierra alrededor de cincuenta y tres partes; y allí se unirían la una a la otra; suponiendo, no obstante, que la sustancia de cada una sea de una y la misma densidad.[24]

23. *Astronomia nova; Gesammelte Werke*, III, pp. 24-25.
24. La proporción implícita de los diámetros de los cuerpos no es del todo correcta.

Kepler procedió luego a demostrar, partiendo del flujo y el reflujo de las mareas, que esta fuerza atractiva en la Luna realmente se extiende a la Tierra, tirando de las aguas de los mares hacia ella misma; era mucho más probable que la fuerza de la Tierra, que era mucho mayor, alcanzara la Luna y fuera mucho más allá de ella, de tal manera que ninguna clase de materia terrestre pudiese escapar de ella.[25]

Está claro que la teoría de la atracción gravitacional no la inventó nadie; creció a través de muchas etapas diversas. Y también está claro que la génesis de la teoría de la gravitación universal se encuentra en Kepler. Los cálculos rápidos que Newton hizo en 1666, su posterior teoría de la Luna, y su teoría de las mareas aparecen en forma embrionaria en la *Astronomia nova*. Pero la atracción era aún específica, aplicable únicamente a la materia terrestre, pesada; Kepler no llegó al extremo de suponer que el Sol y los planetas también eran masas que se atraían mutuamente, o que el equilibrio dinámico que, según él indicaba, retenía a la Tierra y a la Luna en sus órbitas con respecto la una de la otra preservase también la estabilidad de las órbitas planetarias con respecto al Sol. No acertó a ver, como tampoco acertaron Copérnico, Gilbert y Galileo, todo el poder de la atracción gravitacional como concepto cosmológico.

Sin embargo, la clave de todo lo que vino después y de los *Principia* mismos está en la idea kepleriana de que al satélite que gira alrededor de un cuerpo central lo mantienen en su trayectoria dos fuerzas, una de las cuales es una atracción hacia el cuerpo central, aunque aplicada solamente al sistema Tierra-Luna. Al igual que Copérnico, Galileo había creído que las revoluciones planetarias eran «naturales», es decir, inerciales; los cuerpos celestes no estaban sujetos a ninguna fuerza. Kepler, no obstante, creía que la fuerza motriz del universo residía en el Sol, el cual, girando sobre su propio eje, «emite de sí mismo a través de toda la extensión del Universo una imagen inmaterial [especie] de su cuerpo, análoga a la imagen inmaterial [especie] de su luz, la cual imagen gira también en un torbellino de lo más veloz y se lleva consigo en sus vueltas a los cuerpos de los planetas.[26] Cada planeta, además, estaba dotado de su propia "alma" que influía en sus movimientos».[27] Estas ideas hicieron que

25. *Astronomia nova*, pp. 25-27.
26. *Ibid.*, p. 34.
27. *Harmonices mundi* (1619); *Gesammelte Werke*, VI, pp. 264 y ss.

para Kepler resultasen confusos los elementos dinámicos de la situación: dado que la fuerza del Sol actuaba tangencialmente sobre el planeta, Kepler no imaginaba que fuese necesaria una fuerza centrípeta para retenerlo en la órbita. En el caso singular de la Tierra y la Luna se vio obligado a suponer que la «fuerza animal u otra fuerza equivalente» de la Luna bastaba para vencer la atracción hacia la Tierra que hubiera distorsionado la trayectoria. Esta propiedad atractiva, física, de la materia pesada aún no podía emplearse como base para la estabilidad del sistema celeste; era más bien un rasgo perturbador que debían vencer las propiedades cosmológicas de los cuerpos celestes.

Por muy imaginativas, por muy prescientes que fuesen las ideas dinámicas de Kepler, no hay duda de que eran confusas, entre otros motivos porque partían de la suposición aristotélica de que la causa de una velocidad constante tenía que ser una fuerza también constante. Sin embargo, los lectores de sus obras podían encontrar en ellas una posible respuesta al problema cartesiano de las órbitas planetarias: ¿acaso no podía el filósofo postular precisamente tal «afecto corpóreo entre cuerpos afines hacia su unión» que había descrito Kepler como la fuerza centrípeta necesaria para mantener el universo unido?

Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679, al que hemos citado con frecuencia), que de los tres fue el primero en exponer a la atención pública el problema del equilibrio dinámico del movimiento planetario, siguió aún más de cerca los pasos de Kepler al considerar que los rayos de luz que irradiaban de un Sol giratorio y que, por ende, daban vueltas con él, eran palancas que ejercían presión sobre los planetas y los impulsaban en sus círculos. En este sentido, la luz debía considerarse como una emanación material. Borelli explicó que el impulso aplicado, por muy pequeño que fuese, impartiría movimiento a la masa más grande (aunque Descartes había dicho exactamente lo contrario) y, por lo tanto, a falta de resistencia, los planetas se moverían con la misma velocidad que la luz que los impulsara (aquí no se trata de fuerza constante: los planetas son arrastrados como embarcaciones en una corriente de agua):

> Estos rayos, muy eficaces indudablemente, pueden apoderarse de los cuerpos planetarios y hacerles dar vueltas en un vértice solar; porque si la luz es una sustancia corpórea difundida por el cuerpo del sol como algún viento perpetuo, esta sustancia irradiante

> debe también, como el cuerpo del sol, girar en un círculo y entonces es ciertamente posible, de hecho necesario, que los cuerpos planetarios en equilibrio y flotando en el éter celeste sean impelidos a moverse por estos rayos corpóreos.

Si esto es así, ¿por qué no todos los planetas giran a la misma velocidad? Borelli vuelve a recordarnos que los rayos son como palancas —cuanto más lejos del fulcro (el Sol) esté el punto de aplicación, más débil será el impulso de la palanca— y, por ende, cuanto más lejos del Sol se encuentre el planeta, más débil será la fuerza impulsora y menor la velocidad de la misma, porque Borelli *ahora* insiste, con notable incongruencia, en que la resistencia del planeta a moverse aumenta cuanto más lejos está del centro. Sin embargo, Borelli, instruido por Descartes, sabía que para retener los planetas en el vórtice solar era necesario un impulso centrípeto: lo encontró —haciéndose otra vez eco de Kepler— en un «instinto natural» del planeta que le hace aproximarse al Sol en línea recta:

> ... como vemos, todos los cuerpos pesados tienen un «instinto natural» de acercarse a nuestra Tierra, esto es, impulsados por la fuerza de gravedad que les es natural, como el hierro que se desplaza en línea recta hacia el imán. Por esta razón, no sería imposible que el cuerpo del planeta poseyera cierta facultad, como la facultad magnética, por medio de la cual se mueve hacia el globo solar ...

Observarán que Borelli evita cuidadosamente la palabra *atracción* y también que el término *fuerza* lo usa sólo indirectamente, prefiriendo una fraseología casi animista; tampoco identifica con precisión el instinto con la gravedad o el magnetismo. El instinto no es mutuo, ya que no afecta al cuerpo central y, evidentemente, es constante a todas las distancias, como sin duda Borelli también suponía que era la gravedad.[28]

Le quedaba aún por superar una dificultad. De los autores que escribían sobre el sistema del mundo Borelli fue el primero que se tomó en serio las dos primeras leyes keplerianas del movimiento planetario. Por consiguiente, tenía que explicar cómo, en este curioso vórtice, las órbitas no son circulares, sino elípticas. Su explicación

28. Aparte del artículo de A. Koyré en *Revue d'Hist. des Sciences*, 5 (1952), véase la sección sobre Borelli en su *La révolution astronomique*, Hermann, París, 1961, pp. 488, 501.

es ingeniosa: imaginó que cada planeta fue creado fuera de su círculo orbital hipotético. Entonces, supone, la fuerza centrípeta que él ha postulado será superior a la fuerza centrífuga: el planeta, al describir círculos alrededor del Sol, tenderá a acercarse a él y su *momentum* le hará ir más allá, de modo que, después de media revolución, el planeta estará dentro de su órbita. Allí la situación es a la inversa: la fuerza centrípeta es la menor y, por ende, el planeta, que ahora se aleja del Sol, vuelve a su sitio original y el ciclo se repite. A medida que el planeta gana y pierde velocidad en medias revoluciones sucesivas, su velocidad en el perihelio debe ser mayor que en el afelio, de acuerdo con la observación. Así, la elipse —Borelli, por supuesto, no probó que la curva sería una elipse en vez de un círculo excéntrico— es la consecuencia de la oscilación del planeta alrededor de una órbita concéntrica media, una oscilación comparada con la de un cuerpo flotante al que se hunde en el fluido, y luego se suelta, o a la de un péndulo que atraviese la posición estable de reposo en el centro. Más adelante Hooke ilustraría esta segunda analogía con el péndulo cónico, que también puede presentar rotación de la línea de los ápsides.

En la época en que formuló esta teoría, que es matemática sólo en un sentido muy amplio, Borelli se encontraba en Florencia, donde tenía un pequeño observatorio y estudiaba atentamente los satélites de Júpiter, habiendo obtenido una copia de la tabulación de sus movimientos hecha por Galileo unos veinte años antes. Aunque se le conoce principalmente como fisiólogo mecanicista, Borelli, como discípulo de Benedetto Castelli en Roma, se hallaba inmerso en la tradición de Galileo. Durante algunos años enseñó en Messina, adonde volvió durante una temporada tras el fracaso de la Accademia del Cimento. Las intrigas políticas le obligaron a pasar sus últimos años en Roma, patrocinado en parte por la abdicada reina Cristina de Suecia. Con el fin de tener una «tapadera» mínima que le ahorrase problemas con la censura eclesiástica, Borelli escribía como si estuviera tratando únicamente de los movimientos de los satélites de Júpiter y dio a su libro el título de *La teoría de los planetas mediceos deducida de causas físicas* (Florencia, 1666), aunque, como en las citas que hemos visto, no vacilaba en aludir al Sol —que tal vez debían concebirlo en silencio como un astro que giraba alrededor de una Tierra estacionaria quienes así lo desearan— como centro de un sistema parecido, más grande. A decir verdad, pensar que la Tierra o

Júpiter son centros de vórtices de luz irradiante es una notable tontería. Como autor de libros de mecánica, Borelli era discursivo y prolijo, además de confuso. Si bien adoptaba en sus libros el formato proposicional, faltan en ellos tanto los axiomas claramente percibidos como el argumento matemático continuo. El propio Borelli tendía a considerar la mecánica meramente como una escalera por la que ascender a la admirable ciencia del movimiento de los animales. Se ha dicho, con justicia, que «desempeñó un papel importante en la instauración y ampliación de la nueva filosofía experimental-matemática», pero no dio a la misma ni principios claros ni métodos lógicos. Tratar de reducir toda acción dinámica a choque, y analizarla mediante el único recurso constante de Borelli, la ley de la palanca, equivalía a meterse en dificultades imposibles. Sin embargo, no hay duda de que a Borelli se le leía; Newton, que mencionó la «hipótesis de Borelli» en los *Principia*, poseía tres de sus libros en el momento de su muerte, incluyendo el que trataba de los satélites mediceos.[29]

Otros filósofos de la mecánica como, por ejemplo, Marcus Marci y Robert Hooke, estaban tan hundidos hasta el cuello en ideas imprecisas y analogías arriesgadas como Borelli. La precisión conceptual de Hooke no era en modo alguno igual a su fertilidad y tampoco sus capacidades matemáticas estaban a la altura de su habilidad experimental. No fue nunca consciente de sus propias deficiencias, ni se dio cuenta de que en las postrimerías del siglo XVII la mecánica llevaría muy lejos al geómetra, mucho más allá de los límites de Euclides y Apolonio. Ésta sería la causa de la tragedia de Hooke.

Abundan las pruebas de que en 1685 Robert Hooke ya tenía una visión muy completa de un sistema mecánico del universo fundado en la gravitación universal. En los primeros tiempos de la Royal Society Hooke realizó experimentos infructuosos para averiguar si la gravedad varía por encima y por debajo de la superficie de la Tierra. En *Micrographia* (1665) conjeturó que la Luna podía tener un «principio de gravitación» como la Tierra. En un discurso leído ante la Royal Society en 1666 Hooke mejoró lo dicho por Borelli con la suposición de que un «movimiento directo» podía ser torcido en una curva por «una propiedad atractiva del cuerpo colocado en el cen-

29. Thomas B. Settle en *DSB*, II, p. 306. Westfall, *op. cit.* (en nota 12), pp. 213 ss., el mejor estudio general de la ciencia de Borelli. Dado que en 1668 sólo había en Londres un ejemplar de la *Theory of the Medician satellites* (en poder de lord Brouncker), probablemente Newton no la conoció hasta mucho más tarde.

tro».[30] Al igual que autores que le precedieron, comparó esta atracción centrípeta con la tensión del bramante de un péndulo cónico, tensión que obliga a la lenteja a permanecer en su trayectoria circular. En 1678 escribió: «Supongo que el poder de gravitación del Sol en el centro de esta parte del Cielo en la cual estamos, tiene un poder atractivo sobre todos los planetas, ... y que éstos a su vez tienen una relación correspondiente».[31] Ésta es la primera enunciación de la verdadera teoría de la gravitación universal: de la gravedad como principio universal que une a todos los cuerpos del sistema solar. La misma fuerza en virtud de la cual los cuerpos celestes «atraen a sus propias partes, e impiden que se alejen volando» atrae también a «todos los otros cuerpos celestes dentro de la esfera de esta actividad». Es esta fuerza la que, en el Sol, dobla los movimientos rectilíneos de los planetas formando curvas cerradas. Y esta fuerza es «más poderosa en sus efectos cuanto más cerca está el cuerpo sobre el que actúa» del cuerpo que atrae.[32]

Hooke afirmaba que estas ideas ya las había expuesto en 1670. Pero hasta 1679 no se le ocurrió una hipótesis para describir el ritmo de disminución que con la distancia experimenta la atracción gravitacional. En dicho año reanudó la correspondencia con Newton y comentó un experimento destinado a detectar la rotación de la Tierra mediante la desviación de los cuerpos que caían. Esto condujo a su vez a un debate en torno a la naturaleza de la curva que describiría un cuerpo pesado si se le supusiera capaz de caer libremente hacia el centro de la Tierra; durante dicho debate (en una carta a Newton fechada el 6 de enero de 1680) Hooke expuso la proposición de que la fuerza de gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia medida desde el centro de la masa que gravita. Estaba convencido de que esta «ley del inverso de la distancia al cuadrado» de la atracción, combinada con las ideas que ya había bosquejado, bastaría para explicar todos los movimientos planetarios.

Volveremos a ocuparnos de estos intercambios en el próximo capítulo, que dedicamos en su totalidad al tercer hombre que estuvo tentado por el problema cartesiano de la dinámica de la órbita planetaria: Isaac Newton. No hay duda de que la intuición científica de

30. R. T. Gunther, *Early science in Oxford*, VI, Oxford, 1930, p. 266. Publicada para el autor.
31. *Ibid.*, VII, p. 228.
32. *Ibid.*, VIII, pp. 27-28, 229-230, etc.

Hooke era maravillosamente exacta, en esta cuestión además de en otras. De todos los primeros miembros de la Royal Society él era quien poseía la mente más brillante e imaginativa. Los planes para realizar nuevos experimentos y observaciones se le ocurrían tan a menudo que tenía que dividir sus días en una multiplicidad de investigaciones, cada una, en rápida sucesión, sometida a su ingenio y a su percepción íntima. Tenía una opinión —que a menudo, todo hay que decirlo, era bastante interesada— sobre todos los temas que se suscitaban en las reuniones de la Royal Society. El anverso de esta curiosidad inagotable y creativa era que Hooke no completaba nada a la perfección; su primera obra extensa, *Micrographia*, fue también la última. Su reloj de longitud, sus instrumentos astronómicos de gran precisión, sus cuarenta manera de volar, se quedarían en proyectos perdidos para la posteridad. Más afortunado en la mecánica que Borelli —porque al menos recordamos la ley de Hooke, *Ut tensio sic via*,[33] su idea general de la mecánica celeste, tan convincente cuando es resumida y racionalizada por un historiador *a posteriori*, sería siempre fragmentaria, desconectada no demostrada. Como más adelante reconoció amargamente Isaac Newton, se necesitaba mucho más que pericia matemática para obtener una verdadera mecánica a partir de las indicaciones de Hooke. La estructura conceptual que se hallaba a la disposición de Hooke (así como de Borelli) era del todo insuficiente y él no pudo definirla ni enriquecerla. Sólo una inteligencia dotada de claridad y perspicacia supremas podía erigir un edificio clásico, nítidamente definido partiendo del revoltijo de materiales de que disponían los físicos matemáticos del decenio de 1660.

33. «Como la tensión, también la fuerza [aplicada]» o, dicho en términos modernos, la fuerza (tal como la extensión de un muelle) es proporcional a la tensión. La ley de Boyle es una versión especializada.

CAPÍTULO 12

NEWTON

La obra de Newton no fue perfecta y tampoco fue completa; ni los *Principia* ni la *Opticks* serían jamás, en ninguna de sus ediciones, libros absolutamente acabados. En el terreno que había inspeccionado dejó muchas zonas en blanco que llenarían sus sucesores y, de hecho, dejó también varios errores importantes que fue necesario corregir. Sin embargo, con la obra de Newton alcanzó su punto culminante la revolución científica; existía ahora un modelo para los filósofos naturales del futuro. Newton justificó plenamente la confianza de Galileo y de Kepler en la estructura matemática de la naturaleza y probó que los «principios mecánicos» eran una base suficiente para explicar universalmente la ciencia física. Así, la unidad de la naturaleza se hizo manifiesta en una gran síntesis que reveló la aplicabilidad de las mismas leyes, de los mismos principios de explicación, en los cielos y en la Tierra. Las revoluciones planetarias de Copérnico, las leyes de Kepler, los descubrimientos efectuados por Galileo y Huygens relativos a los fenómenos de la gravedad y el movimiento... quedó demostrado que todo ello era consecuencia de estas leyes y estos principios y estaba abarcado en la misma síntesis. De una manera nueva, reformada por el concepto newtoniano de la fuerza, la filosofía mecanicista fue vindicada; tras demostrarse que era susceptible de desarrollo matemático, su alcance se hizo extensivo a la teoría del movimiento ondulatorio e incluso a la luz misma. Los *Principios matemáticos de la filosofía natural* (1687), de Newton, fueron la culminación del esfuerzo científico del siglo XVII, de sus esfuerzos por experimentar y matematizar, de su reacción contra la tradición y de su búsqueda de cimientos conceptuales nuevos y más firmes.

Newton probó que el mundo se parecía mucho a la imagen que de él tenían los «nuevos filósofos»: los gigantes sobre cuyos hombros se alzaba Newton habían buscado en la dirección acertada, pero él había visto más que ellos.

En Newton las virtudes conceptuales y matemáticas se unían para formar una combinación de poder extraordinario, una combinación que ni la herencia ni el ambiente logran explicar de modo satisfactorio. Nacido el día de Navidad de 1642, hijo único de una extensa familia de agricultores de Lincolnshire, apenas clasificables como miembros de la burguesía agraria, analfabetos algunos de ellos, la única inferencia obvia de su infancia es que poseía capacidad para la reflexión y para construir artilugios mecánicos. Al parecer, lo mandaron a Cambridge porque su madre (viuda y vuelta a casar, lo cual, suponen algunos, disgustó profundamente al pequeño Isaac) no encontró en él prácticamente ninguna habilidad útil. Sus años de estudiante en Cambridge tampoco parecen dignos de atención, pero en 1669 pasó a ser el segundo «Lucasian Professor» de matemáticas en la universidad. Seguramente este paso tuvo algo que ver con el interés de su predecesor, Isaac Barrow (que se fue para ocupar el puesto de capellán real, volviendo como director del Trinity College, que era el de Newton, cuatro años después); Barrow no fue nunca tutor de Newton, y puede que tampoco fuera su mentor en ningún sentido, pero se percató del genio de Newton y le ayudó a cultivarlo. Durante casi treinta años Newton fue un académico laborioso que virtualmente no daba clases y cumplía sus obligaciones profesionales de manera bastante escrupulosa para lo que era normal entonces.

No se sabe a ciencia cierta si Barrow tuvo o no una idea clara de lo verdaderos logros de Newton antes de 1669. He aquí uno de los resúmenes de la creatividad juvenil de Newton escrito por él mismo mucho tiempo después:

> 4 de julio de 1699. Consultando una cuenta de mis gastos en Cambridge en los años 1663 y 1664 compruebo que en el año 1664, poco antes de Navidad, siendo yo el «senior Sophister», compré las *Miscellanies* de Schooten y la *Geometry* de Cartes (habiendo leído esta Geometría y la de Oughtreds Clavis más de medio año antes) y tomé prestadas las obras de Wallis y en consecuencia hice estas anotaciones a partir de Schooten y Wallis en el invierno entre los años 1664 y 1665. Momento en que encontré el método de las

> series infinitas. Y en el verano de 1665, viéndome obligado a salir de Cambridge por la peste, computé la superficie de la hipérbola en Boothby en Lincolnshire hasta dos y cincuenta cifras por el mismo método. Is. Newton.[1]

Barrow conocía la esencia de todo esto; él fue quien envió el trabajo de Newton titulado *De analysis* a Collins en Londres, en julio de 1669; le siguió un *Tratado sobre los métodos de series y diferenciales*, escrito en 1671. Puede que no estuviera tan enterado de otros estudios, recordados también por Newton al cabo de muchos años:

> A principios del año 1665 encontré el método de series aproximadas y la regla para reducir cualquier elevación de cualquier binomio en una serie semejante. En el mismo año, en mayo, encontré el método de tangentes de Gregory y Slusius, y en noviembre tuve el método directo de las fluxiones y al año siguiente, en enero, tuve la teoría de los colores, y en mayo siguiente tuve entrada en el método inverso de fluxiones. Y el mismo año empecé a pensar en la gravedad extendiéndose a la órbita de la Luna; y habiendo averiguado cómo calcular la fuerza con la cual un globo que da vueltas dentro de una esfera aprieta la superficie de la esfera: de la regla de Kepler de los tiempos periódicos de los planetas estando en una proporción sesquiáltera de sus distancias de los centros de sus órbitas, deduje que las fuerzas que mantienen a los planetas en sus órbitas deben ser recíprocamente como los cuadrados de sus distancias desde los centros alrededor de los cuales giran: y por este medio comparé la fuerza requerida para mantener a la Luna en su órbita con la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra, y encontré las respuestas muy aproximadas. Todo esto fue en los años de la peste de 1665 y 1666. Porque en aquellos días yo estaba en la flor de mi edad para la invención y me preocupaba por las matemáticas y la filosofía más que en cualquier otra época desde entonces.[2]

1. University Library, Cambridge ms add. 4.000, 14 v°. Citado en D. T. Whiteside, *Mathematical papers of Isaac Newton*, Cambridge U. P., Cambridge, 1967-1981, I, pp. 7-8.

2. ULC, ms add. 3.968, f. 85, de I. Bernard Cohen, *Introduction to Newton's Principia*, Cambridge U. P., Cambridge, 1971, p. 291. Tanto este pasaje como el último citado ya habían sido publicados muchas veces. Probablemente este pasaje pertenece a 1718: véase A. Rupert Hall y Laura Tilling, *Correspondence of Isaac Newton*, VI, Cambridge U. P., Cambridge, 1976, pp. 454-462.

Algunos de los acontecimientos que se citan en este borrador escrito de memoria, luego tachados, parecen estar fechados con un año de retraso; lo que es más significativo es que, hablando en términos generales, todos han sido confirmados por el examen de las libretas de apuntes, cartas y papeles de Newton. Las líneas generales de gran parte de la futura labor de Newton se trazaron en los años 1665-1666, aunque sin duda es cierto que muchos resultados concretos e importantes se obtuvieron por primera vez en años posteriores, y que sus pensamientos en el campo de la mecánica y la gravitación, especialmente, maduraron despacio. En 1666 Newton era mucho más favorable a la filosofía cartesiana que en años posteriores. Pero tal vez lo más importante de todo sea que Newton se formó como matemático. Para él siempre resultaría natural, incluso años después, cuando se ocupaba de los asuntos de la Real Casa de la Moneda, pensar en términos de cantidad y número. Newton no hizo declaraciones como las de Kepler sobre la geometría de la creación, pero, no menos convencido que Kepler de la realidad de la imagen del Divino Arquitecto, es indudable que veía el universo como algo profundamente ordenado, en el espacio y el tiempo, y, por consiguiente, creía que las relaciones matemáticas inherentes a su estructura física eran fruto de la voluntad de Dios:

> Pues si bien los cometas se mueven en órbitas muy excéntricas en toda suerte de posiciones, el destino ciego jamás podría hacer que todos los planetas se movieran de una sola y misma manera en órbitas concéntricas, exceptuando algunas irregularidades inconsiderables, que pueden haber surgido de las mutuas acciones de los cometas y los planetas, y que serán propensas a aumentar, hasta que este sistema necesite una reformación. A tan maravillosa uniformidad en el sistema planetario debe concedérsele el efecto de la selección.[3]

Así, pues, Barrow sabía hasta dónde había llevado Newton las matemáticas en los métodos de los infinitesimales y las series infinitas; también sabía algo al respecto John Collins, que inició correspondencia con Newton y copió algunos de sus trabajos sobre las fluxiones (esto es, el *calculus*) y finalmente, a través de Collins y Oldenburg, también sabían algo algunos matemáticos continentales,

3. *Opticks*, Londres, 1931, reimpresión, p. 402.

incluyendo a Leibniz, aunque éstos entendían la obra de Newton mucho menos de lo que su autor creía. También matemáticos ingleses y escoceses, en especial estos últimos (David Gregory, sobrino de James, y John Craig) recibieron permiso para estudiar los papeles de Newton en privado. Pero a principios del decenio de 1690 John Wallis seguía ignorando la labor de Newton, que ya databa de un cuarto de siglo, y le reprendió severamente por no publicar un material que habría proporcionado prestigio a su país. Finalmente, Wallis en 1695 y 1699, el propio Newton en 1704 (agregando dos breves tratados de matemáticas a *Opticks*) y William Jones en 1711 rompieron el largo silencio. Para entonces otros científicos habían duplicado casi todos los trabajos que Newton realizara en los decenios de 1660 y 1670. Sus viejos papeles sólo tenían interés histórico.

A finales de 1675 Leibniz, que a la sazón residía en París y que, guiado por Huygens, iba subsanando rápidamente los defectos de su educación matemática, había tenido la idea de usar los diferenciales (infinitesimales) como cantidades algebraicas, siendo su enfoque aritmético en vez de geométrico como el de Newton. Resolvió y desarrolló las repercusiones de su idea con extraordinaria rapidez. En junio de 1677 ya pudo enviar a Oldenburg [4] (para Newton) una carta en la que elogiaba brevemente algunos de los «teoremas en verdad muy elegantes» y comentarios sobre el método de interpolación de Wallis que anteriormente le había enviado Newton, y añadir después la opinión «estoy de acuerdo con Newton en que el método de las tangentes de Sluse aún no ha alcanzado la perfección», con una descripción completa de la diferenciación elemental y su aplicación al problema de dibujar tangentes. «En mi opinión —agregó— lo que Newton optó por ocultar acerca del dibujo de tangentes no está muy lejos de éstas». Leibniz supuso acertadamente que Newton le llevaba la delantera en lo que se refería a métodos de extracción de raíces y series infinitas, todo ello relacionado con el «método inverso» de las tangentes o integración. En vano pidió que Newton cooperase voluntariamente en el perfeccionamiento de estas prometedoras técnicas nuevas.[5] Newton no contestó a su carta, tal vez porque no pudo. Luego todo permaneció en calma —Leibniz había iniciado una nueva carrera como historiador oficial en Hanover— hasta que Leibniz

4. De hecho, Oldenburg había muerto en septiembre de 1677.
5. Newton, *Correspondence*, II, Cambridge U. P., Cambridge, 1960, pp. 212-231.

imprimió una compleja explicación de su método de las diferenciales en el *Acta eruditorum* (1684). Newton replicó con una nota sobre su propio sistema anterior en los *Principia* (1687).

¿De qué manera los descubrimientos de Newton el matemático puro facilitaron la tarea de Newton el físico? La pregunta no es nada sencilla. Cierto es que el método de las diferenciales (que es una especie de álgebra) no se emplea en absoluto en los *Principia* (que son totalmente geométricos). También es verdad que carece de sustancia la afirmación que el propio Newton hizo más adelante en el sentido de que las proposiciones de los *Principia* habían sido descubiertas mediante análisis (fluxiones) y reescritas luego en la forma geométrica tradicional a la sazón conocida de los matemáticos: los *Principia* tal como se publicaron eran los *Principia* tal como se redactaron, no hubo ninguna versión algebraica antecedente. Por otra parte, no es (como ha argüido Whiteside) un libro que para sus resultados dependa de un conocimiento peculiarmente profundo de la geometría griega.[6] Antes bien la principal característica del estilo matemático de Newton en los *Principia*, tan distinto del estilo puramente tradicional de Huygens en *Horologium oscillatorium*, ha sido definido como «su creciente pericia con (y, por supuesto, su firme preferencia por) argumentos que lleven aparejado infinitesimales de primer orden o mayores». El reconocimiento de los *Principia* como una gran obra del cálculo leibniziano —en contenido, se entiende, no en forma— era común en las postrimerías del siglo XVII y durante el siglo XVIII. Tal como señala Whiteside, los elementos de este método infinitesimal no eran ni fluxiones ni diferenciales, sino el límite de incrementos geométricos de segmentos lineales variables. Podríamos decir toscamente que se trataba de *calculus* con vestigio geométrico, argumentado de manera retórica en vez de simbólica, y sin una estructura formal precisa.

> En un recuento aproximado [escribe Whiteside] alrededor de la mitad de los problemas que se plantean en los tres libros de los *Principia* se reducen a determinar una ecuación apropiada que lleve aparejadas dos variables fluentes y sus infinitesimales de primer,

6. D. T. Whiteside, «The mathematical principles underlying Newton's *Principia Mathematica*», en *Journ. Hist. Astronomy*, 1 (1970), pp. 116-138 (citas, 119, 120 [ligeramente abreviadas]).

> segundo y a veces tercer orden y luego encontrar la relación que conecta las variables fluentes solas.

Así, aunque los *Principia* tienen poca o ninguna relación con la evolución de Newton y su empleo de un *calculus* formal o algoritmo, aportan pruebas abundantes de que el éxito de Newton como físico teórico estuvo condicionado por su originalidad como matemático, pues es indudable que en el principal período de redacción del libro (1685-1686) Newton no tenía rival en lo que hace al dominio de los métodos infinitesimales.

Las matemáticas fueron la causa de muchos problemas y congojas en la vida personal de Newton. Un joven matemático suizo, Nicholas Fatio de Duillier, después de conocer a Newton en Londres diez años antes y (que se sepa) convertirse en su amigo más íntimo, en 1699 acusó a Leibniz de haber plagiado la idea del *calculus* diferencial de Newton y de haberla publicado como si fuera suya. Semejante acusación contra un erudito reconocido como uno de los intelectos más grandes de Europa, cuyas innovaciones matemáticas las habían adoptado y perfeccionado hombres distinguidos y más jóvenes, no podía menos de ser escandalosa; sin embargo, la réplica de Leibniz fue serena y modesta. Escribió que no tenía nada contra Newton y le dedicó sus elogios al mismo tiempo que no renunciaba ni a un ápice de su propia postura:

> Ningún geómetra que yo conozca [escribió] anterior a Míster Newton y a mí mismo tenía ese método; del mismo modo que nadie antes de ese geómetra de gran fama había probado mediante ejemplo público que él lo poseyera [en los *Principia*, esto es]; y antes que Míster [Johann] Bernoulli y yo mismo nadie lo comunicó.[7]

Así, pues, la disputa se calmó, hasta que en 1705 Leibniz, al hacer la reseña de los tratados de matemáticas publicados con *Opticks*, usó ciertas expresiones que, al ser llevadas a la atención de Newton por unos amigos oficiosos, le hicieron montar en cólera por parecerle que impugnaban su propia prioridad. Newton movilizó entonces aquel poder de concentración y aquel dominio del detalle tan remarcables en un hombre de casi setenta años y los utilizó para preparar una

7. A. Rupert Hall, *Philosophers at war*, Cambridge U. P., Cambridge, 1980, p. 125.

colección de correspondencia, la *Commercium epistolicum* (1712), que se remontaba al conocimiento de Barrow de su primera comunicación (cuando menos por medio de suficientes indicaciones) a Leibniz. La batalla subsiguiente consumió las energías del anciano filósofo —debido en parte a que seguía activo en otras cuestiones— hasta casi su octogésimo año. Leibniz murió parcialmente en 1716.

Ahora podemos estar seguros de que Newton tenía razón y al mismo tiempo estaba equivocado y que tal vez en último término, desde el punto de vista ético, Leibniz resultó más perjudicado que Newton. Porque si no cabe ninguna duda de que Newton inventó antes los métodos del cálculo, es igualmente cierto que Leibniz fue el primero en hacerlos públicos; la independencia de su descubrimiento también está más allá de la duda, como lo está la falsedad de los taimados latrocinios que Newton y sus amigos imputaron a Leibniz. Puede decirse que Leibniz y sus seguidores provocaron a los newtonianos, los minimizaron y rehusaron concederle a Newton la prioridad que cuando menos atestiguaban los *Principia*; por otra parte, ningún genio ha montado una campaña tan poco escrupulosa contra un oponente como la que Newton organizó contra Leibniz.

Un rasgo curioso de este extraordinario asunto, que las gentes cultas de Europa siguieron con asombrado regocijo, es su relación con la experiencia previa de Newton. Como ya hemos indicado en el capítulo 10, la publicación de la primera carta óptica de Newton arrastró a éste a una polémica aparentemente interminable, hasta tal punto que Newton amenazó con abandonar la filosofía por completo, alegando que era una dama demasiado litigiosa para merecer su devoción. Newton se propuso dimitir de la Royal Society, a la que había sido elegido no mucho antes gracias a su telescopio reflector. Sin embargo, le impidieron presentar la dimisión. Por mucho que podamos simpatizar con la perplejidad y la incredulidad de los que criticaban los experimentos prismáticos de Newton, así como la «doctrina» que su autor basó en ellos, la persistencia, la ceguera y la leal adhesión a ideas preconcebidas (las cuales, si estaban reforzadas por la familiaridad, ciertamente no estaban mejor apoyadas por el experimento y la razón que las del propio Newton) de tales críticos eran extremadamente tediosas. Newton escribió muchos miles de palabras para darles respuesta, que en parte era verdaderamente necesaria como reformulación, aunque tenía poco de creativa. Nunca olvidó esta experiencia, nunca superó la sensación de que la mayoría de los «filó-

sofos» eran chapuceros inútiles y tercos, nunca perdonó a Robert Hooke el que dirigiese el coro de críticas incomprensivas partiendo de la premisa de que su propia teoría de la luz, tal como estaba descrita en *Micrographia*, era perfectamente satisfactoria, de modo que no hacía falta hablar más del asunto.[8] Muchos años después, cuando los *Principia* se presentaron ante el mundo y Newton (como tenía por costumbre) había pasado unos cuantos años rehaciendo privadamente el texto, sacó sus viejos papeles y notas sobre óptica y los reescribió hasta darles más o menos la forma actual de *Opticks*. Pero guardó el libro en el cajón durante diez años más hasta que la muerte puso fin a las facultades críticas de Robert Hooke.

Para entonces Newton había sostenido una discusión con Hooke (1686) por cuestiones de prioridad en la cual todo el mundo concedió la victoria a Newton. Su anterior desconcierto no le había impedido hacer serios esfuerzos por conseguir que en Cambridge le publicasen parte de sus trabajos sobre óptica y matemáticas a principios del decenio de 1670; ni le había impedido enviar una segunda comunicación, muy larga, sobre la luz a la Royal Society a finales de 1675, comunicación que, sin embargo, no permitió que se publicara.

Mientras tanto, casi desde el momento de su elección a la cátedra «Lucasia», Newton se había entregado con entusiasmo a la realización de experimentos químicos, de los cuales no dijo ni una palabra en sus recuerdos autobiográficos; los indicios públicos de su interés y su pericia en esta rama de la ciencia se encuentran en su mayor parte en la cuestión 31 del final de *Opticks*, aparte de un pequeño trabajo titulado «Sobre la naturaleza de los ácidos» que probablemente se publicó sin su conocimiento. La experimentación química era bastante normal: Carlos II tenía un laboratorio en Whitehall, su sobrino el príncipe Ruperto era experto en las artes prácticas de la química, había muchos otros aficionados y existía el sublime ejemplo de Robert Boyle. Todo el mundo tenía que empezar, como hizo Newton, comprando algunas retortas y otros aparatos, construyendo un horno y adquiriendo productos químicos. No hay ningún misterio en esto ni en que Newton adquiriese, como solía ocurrir, una especie de habilidad valetudinaria para la preparación y la dosificación. En años recientes se ha dado mucha importancia a las investigaciones químicas de Newton y a su supuesta relación con la filosofía natural

8. Newton, *Correspondence*, III, Cambridge U. P., Cambridge, 1961.

de su madurez, ya que (al parecer) tales investigaciones iban acompañadas de la compra y el minucioso estudio de libros sobre alquimia y la evolución del conocimiento de los alquimistas, además de químicos menos extravagantes como, por ejemplo, Boyle y John Vigani (que también estaba en Cambridge). Ciertamente, Newton aplicó su cerebro singular, poderoso, a una enorme masa de material que aquellos que tienen los ojos puestos en el progreso de la ciencia natural encuentran anticuado, sin sentido y repelente. El propio Newton no le hacía ascos a la utilización del vocabulario convencional (los nombres planetarios para los metales, por supuesto; el roble, las palomas de Diana, etcétera).

¿Cuál era el significado de esta actividad, en la que (como en sus escritos teológicos) puede parecer que Newton esté mirando hacia atrás en lugar de hacia delante? Cabría argüir que este «mirar hacia atrás» depende exclusivamente de nuestro punto de vista: desde luego, Newton no era más alquimista que Boyle (suponiendo que sea sensato aplicar el término a uno y a otro) y cada uno de ellos conocía las inquietudes del otro; asimismo, Newton y el filósofo Locke compartían recónditas interpretaciones de las Escrituras. La *Cronología de los reinos antiguos* de Newton fue considerada en su tiempo como una propiedad literaria que valía la pena robar. Sea como fuere —y hasta transcurrido un siglo o más desde la muerte de Newton no se establecería la poca fiabilidad de los mitos clásicos y de la Biblia como guías exactas, cronológicas, de la historia—, el deseo del gran lord Keynes de demostrar que Newton era un hombre además de un matemático, mostrándole como mago, alquimista y hereje, ciertamente ha fomentado los equívocos. Pudiera encontrarse cierta causa para dudar en el hecho de que Newton dejara medio volumen de anotaciones matemáticas y siete volúmenes y medio de su propio trabajo; en contraste, dejó un millón de palabras copiadas de textos de alquimistas; entre ellas hay dos o tres trabajos cortos que se suponen redactados por él mismo.[9] Es extraño que, si bien Newton anotaba con cuidado sus experimentos químicos,[10] contrariamente a su costumbre universal, por lo demás redactara pocas cosas propias. No

9. La comparación matemática procede de la edición de Whiteside: la conjetura del millón de palabras (que se repite a menudo) procede de J. M. Keynes en Royal Society, *Newton tercentenary celebrations*, Cambridge U. P., Cambridge, 1947.

10. A. R. y M. B. Hall, en *Archives Inst. d'Hist. des Sciences*, 11 (1958), pp. 113-152.

obstante, algunos autores recientes han argüido que la atribución de «poderes, virtudes o fuerzas» a las partículas de la materia refleja la influencia de la tradición hermética en el pensamiento de Newton.[11]

Por supuesto, Newton construyó un horno en el jardincillo cercano a la Puerta Grande del Trinity College, donde había una escalera exterior que llevaba a su aposento, y que pasaba muchas horas vigilando sus fuegos; también es cierto que estudiaba larga y detenidamente la «estrella» cristalina del antimonio, y que cultivaba el arte de volatizar los metales. En la filosofía de su tiempo no había nada que negase la posibilidad de cambios químicos mucho más espectaculares que los que ahora sabemos que son posibles, incluyendo la alteración de la especie de los metales. En aquel tiempo nadie creía que los metales fuesen elementos; parecía que del mismo modo que se sabe que el latón y el bronce (al ser aleaciones) están compuestos por cuando menos dos clases de partículas, también los metales «sencillos» como, por ejemplo, el cobre, podían consistir en más de una clase y, por ende, tener (en principio) una composición alterable. Suponiendo que esto fuese hipotéticamente cierto, la cuestión era saber si la intervención humana podía actuar sobre los metales hasta el punto de cambiar *de facto* su composición. Muy posiblemente Newton creía o esperaba que la sabiduría oculta de los autores de libros sobre alquimia podría descifrarse y revelar la respuesta, ya que él también trataba de descifrar fuentes históricas y bíblicas. Si así era, no hay duda de que se llevaría una decepción. Sin embargo, en una carta a John Locke posterior a la muerte de Robert Boyle, Newton escribió (agosto de 1692): «Me he abstenido de decir algo contra la multiplicación en general porque pareces persuadido de ella: aunque hay un argumento contra ella al que yo nunca podría encontrar respuesta». Por desgracia, no tenemos la carta posterior en la que Newton prometía exponer este argumento; la «multiplicación» era un paso hacia la transmutación, un incremento artificial de la masa metálica. En este caso Newton se muestra más escéptico que Boyle o Locke, y evidentemente lo era desde hacía algún tiempo; se resistía a probar un método que el difunto Boyle había esperado que Newton empleara.[12]

11. B. J. T. Dobbs, *The foundations of Newton's alchemy*, Cambridge U. P., Cambridge, 1975; R. S. Westfall, *Never at rest*, Cambridge U. P., Cambridge, 1980, con mucho la mejor biografía de Newton.

12. Newton, *Correspondence*, III, pp. 217-219. No es fácil distinguir en qué

Está claro que los experimentos químicos llenaron un espacio de alrededor de cuatro años en la vida de Newton (1675-1679), espacio del que, por lo demás, poco se sabe. Su estudio experimental y matemático de la luz ya estaba terminado (el último representado por la publicación póstuma de *Optical lectures*), era reacio a «dedicar más que una cantidad mínima de su esfuerzo creativo a la investigación matemática» y, a decir verdad, tal como escribió a Robert Hooke hacia el final de esta fase, «había estado esforzándome por abandonar la Filosofía en aras de otros estudios por cuanto desde hace tiempo he lamentado el tiempo empleado en ese estudio a menos que fuera en horas de ocio a veces por diversión». En aquella época Newton se aislada todo lo posible del mundo exterior y no se movía de Cambridge.[13]

De este aislamiento le arrancó Robert Boyle,[14] a cuya amistad Newton creía deber «mis pensamientos acerca de las cualidades físicas de las que hablamos», las cuales expresó en forma de una compleja hipótesis etérea neocartesiana, aun cuando «mis ideas sobre las cosas de esta clase son tan indigeridas que yo mismo no me siento del todo satisfecho», y algo más tarde, también en 1679, irónicamente quien le sacó de su aislamiento fue Robert Hooke, al que habían nombrado secretario de la Royal Society como sucesor del difunto Henry Oldenburg un par de años antes. La respuesta que dio Newton cuando Hooke le invitó a iniciar una correspondencia filosófica fue desalentadora; había «estrechado la mano de la filosofía». Sin embargo, aunque (citando las palabras que dirigió a otro corresponsal algo más adelante) «Soy de todos los hombres adultos el que más teme escribir algo que pueda dar pie a disputas», Newton no pudo resistir la tentación de recompensar la insistencia de Hooke con un pensamiento propio:

> Me alegra saber que un descubrimiento tan considerable como el que hiciste del paralaje anual de la Tierra es secundado por las

pensaba Newton cuando escribió esta carta, excepto que sentía poco entusiasmo por las «recetas» de Boyle: «una de ellas un Expt. considerable & puede resultar útil en medicina para analizar cuerpos, la otra es sólo un truco».

13. D. T. Whiteside, *Mathematical papers of Isaac Newton*, IV, Cambridge U. P., Cambridge, 1971, introducción general. Un importante esfuerzo matemático por parte de Newton en aquellos años fue la preparación de sus dos extensas cartas de 1676 para Leibniz, pero los materiales básicos para ellas estaban a mano.

14. Newton a Boyle, 28 de febrero de 1679 (*Correspondence*, II, pp. 288 ss.).

> observaciones del señor Flamstead. En correspondencia a su anuncio te comunicaré una fantasía mía acerca del descubrimiento del movimiento de rotación de la Tierra.[15]

Newton razonó que un objeto, al caer desde una torre alta, debería desviarse levemente hacia el este de la línea perpendicular de descenso y trazar una curva espiral desde un punto situado por encima de la superficie de la Tierra hasta su centro. Obviamente, Newton no había trazado ninguna analogía mental entre un proyectil en la Tierra y un satélite en los cielos, aunque varios años después haría esta comparación muy explícita; Hooke, sin embargo, ya la había hecho y señaló con términos enérgicos el error de Newton. A falta de resistencia por parte del aire (y si la Tierra se cortaba en dos dejando un espacio entre las dos mitades) el cuerpo cayente describiría una *elipse* y volvería al punto de partida. Se advierte claramente que Hooke había aprendido algo de Kepler.[16]

Así, pues, para entender esta situación hay que hablar un poco de las leyes de Kepler en el siglo XVII, antes de que Newton las incorporase en la mecánica celeste. No se prescindía de dichas leyes: por ejemplo, están muy bien resumidas en un libro de matemáticas publicado en varios volúmenes: *Cursus mathematicus* (1634-1642), de Pierre Hérigone.[17] Los matemáticos Ismael Boulliaud (en Francia) y Seth Ward (en Inglaterra) y muchos más después de ellos adoptaron la órbita elíptica de Kepler, pero sin la segunda ley; encontrando, como Kepler había encontrado, que la ley de las áreas no era susceptible de manipulación matemática, la abandonaron por varias teorías arbitrarias en virtud de las cuales la posición del planeta sobre la elipse estaba relacionada con el radio vector entre el planeta y el foco *vacío*. Si se especifica que este radio vector da vueltas de manera bastante sencilla, entonces el movimiento según la ley de áreas puede reproducirse con bastante exactitud. Así fue cómo al principio entendió Newton las hipótesis de Kepler —que aprendió en la *Astronomia carolina* (1661) de Thomas Streete— experimentando él mismo con varios artificios de esta clase, toda vez que Streete no indicaba la ley

15. Newton a Hooke, 28 de noviembre de 1679, *ibid.*, pp. 300-303. La supuesta observación por Hooke del cambio paraláctico anual en α Draconis resultó no valer para nada.
16. *Ibid.*, vol. II, pp. 305 ss., y III, pp. 438 ss.
17. J. L. Russell, «Kepler's laws of planetary motion», en *Brit. Jour. Hist. Sci.*, 2 (1964), pp. 1-24.

de áreas, aunque Newton hubiera podido encontrarla en libros tan utilizados como el *Amagestum novum* (1651) de G. B. Riccioli y en un pequeño tratado de Wren que publicó Wallis (1659). De hecho, en 1679 Newton todavía estaba investigando el arbitrario tratamiento del foco vacío de la segunda ley de Kepler y, por lo tanto —como confirma su primera respuesta a Hooke, que acabamos de citar—, era totalmente inocente de atribuir una trascendencia dinámica a las leyes primera y segunda. De lo toscas, de lo poco newtonianas que eran sus ideas en esta etapa son prueba evidente las cartas que cruzó con el Astrónomo Real, John Flamsteed, en 1681 acerca del movimiento cometario.[18]

Muy distinto fue el caso de la tercera ley: $T^2/r^3 = k$, que Newton también aprendió de Streete, probablemente en 1664.[19] Porque, es de suponer que en un tiempo no muy lejano, Newton ya había abordado el problema cartesiano de la fuerza centrífuga (ignorando lo que Huygens ya había hecho en privado pero no publicaría hasta 1673), y descubrió la proporcionalidad V^2/r.[20] A cualquiera que, al tropezar con la tercera ley de Kepler, tenga esta proporcionalidad en mente le resultará casi evidente de por sí que la fuerza centrífuga de los planetas con respecto al Sol debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Newton no fue más allá al exponer por primera vez la relación del inverso de la distancia al cuadrado y los datos que tenemos inducen a pensar que durante muchos años conservó la idea del vórtice etéreo, concepto que menciona sin titubeos en cartas de 1681.[21] La realidad del vórtice la sugirió también la discrepancia (de la que habla en su autobiografía) en su cálculo de que el efecto de la gravedad llegaba hasta la Luna (1609?, 1670): suponiendo que la Luna distara 59 o 60 radios terrestres, una ley del inverso de la distancia al cuadrado haría que la gravedad terrestre a esa distancia no fuera superior a 1/3.600 de la gravedad sobre la Tierra, pero Newton la calculó partiendo de que la velocidad de la Luna en su órbita era de 1/4.000 a lo sumo.[22] Aunque no hubiera habido la dis-

18. D. T. Whiteside, «Newton's early thoughts on planetary motion», en *Brit. Jour. Hist. Sci.*, 2 (1964), pp. 117-137; y *Journ. Hist. Astronomy*, 1 (1970), pp. 5-15.
19. *Astronomia Carolina*, Londres, 1661, p. 39.
20. J. W. Herivel, *The background to Newton's Principia*, Oxford U. P., Oxford, 1965.
21. *Correspondence*, II, pp. 331, 341.
22. *Ibid.*, I, pp. 297-303. El error de Newton se debió a tomar (del *Dialogo* de Galileo) un valor demasiado pequeño para el radio de la Tierra. Sin duda Newton leyó

crepancia accidental en esta versión de la «prueba lunar», Newton también habría estado lejos de la gravitación como fuerza universal, y de la demostración matemática de que la forma elíptica, la ley de áreas y la ley del inverso de la distancia al cuadrado de la fuerza eran todas partes congruentes de una sola unidad dinámica.

Cuando Robert Hooke, después de que la primera parte de los *Principia* fuera recibida con entusiasmo por la Royal Society de Londres, se quejó de que Newton hubiese recibido de él la idea de la ley del inverso de la distancia al cuadrado de la gravedad, «aunque [Hooke] reconoce que la demostración de las curvas generada de tal modo es totalmente tuya», Newton pudo aportar seguridades y pruebas de que la había conocido antes: después de todo, añadió con enojo, ¿qué había hecho Hooke si no publicar la «hipótesis de Borel» bajo su propio nombre?:

> Borel hizo algo al respecto y escribió modestamente, él no ha hecho nada y pese a ello ha escrito como si conociera y hubiera indicado suficientemente todo menos lo que quedaba por determinar mediante el arduo trabajo de cálculos y observaciones ... resulta claro por sus palabras que no sabía cómo hacerlo. Ahora, ¿no está esto muy bien? Los matemáticos que averiguan, resuelven y hacen todo el trabajo, deben contentarse con no pasar de ser aburridos calculadores y rutinarios, y otro que no hace nada salvo fingir y tratar de apoderarse de todo debe llevarse toda la invención, tanto de aquellos que debían seguirle como de aquellos que le precedieron ...[23]

La indignación de Newton le había impulsado a este tercer estallido, en la furiosa invectiva que fustigaría a Leibniz en años venideros. No es difícil comprenderle: Hooke se había mostrado *casi* tan impreciso como Borelli y, ciertamente, jamás hubiese podido hacer demostraciones dinámicas aplicables al movimiento planetario; pese a ello, cabe admitir que la idea de que un proyectil terrestre se convertía en un satélite en órbita elíptica era del propio Hooke, aunque, de hecho, fuera una «conjetura» como acertadamente la llamó Newton, además Hooke había dicho (de manera confusa, cierto

---

el citado libro en la versión inglesa (1661) o latina (1635); nunca leyó las *Consideraciones y demostraciones*, que eran casi inaccesibles en inglés.

23. *Ibid.*, II, p. 438. Newton a Halley, 20 de junio de 1686.

es) que «la velocidad [del hipotético cuerpo cayente que se está comentando] estará en una proporción subduplicada a la atracción [$V \alpha f^{1/2}$] y consiguientemente como Kepler supone recíproca a la distancia», que es otra manera, inferior pero kepleriana, de formular la segunda ley para la elipse.

Dos veces pidió Hooker a Newton que le resolviera matemáticamente todas estas ideas. Newton mantuvo un silencio digno, nada cooperativo; pese a ello, resolvió el problema. Nunca sabremos cómo lo resolvió, ya que menos de cinco años después, cuando el joven astrónomo Edmond Halley (que había trabajado con Flamsteed en Greenwich) fue a visitar a Newton en Cambridge (agosto de 1684), esa demostración ya se había perdido. Pero Newton pudo asegurar a Halley que la curva producida por una fuerza atractiva variando como el cuadrado inverso de la distancia sería una elipse, y poco después pudo proporcionarle una demostración de este hecho y mucho más también. El punto decisivo fue la proposición que aparece en primer lugar en el libro I de los *Principia*: cuando un cuerpo gira alrededor de un centro de fuerza las áreas descritas por los radios vectores son proporcionales a los tiempos transcurridos, sin importar qué ley de fuerza describe la curva. Esta es una forma dinámica maravillosamente general de la segunda ley de Kepler y aparece ya en las *Proposiciones sobre el movimiento* que Newton escribió en el otoño de 1684 y envió a la Royal Society; es un boceto en líneas generales de los futuros *Principios matemáticos de la filosofía natural*. La prueba de esta proposición fundamental depende del razonamiento relativo a los segmentos rectilíneos infinitesimales y las áreas delimitadas por ellos, y una fuerza central actuando en impulsos instantáneos, infinitesimales (cuya magnitud no tiene que considerarse), interpretados con la ayuda del paralelogramo de fuerzas. Es elegante de un modo casi infantil.

Durante los dieciocho meses siguientes Newton escribió gran parte de los *Principia*, aunque no toda ella tal como se publicaría. Fue un logro asombroso que podemos medir con mayor exactitud comparando las *Proposiciones* —que dinámicamente eran aún un poco ingenuas, mostrando mayor complejidad en las matemáticas— con los maduros *Principia*: empleando también una versión manuscrita incompleta pero bastante fiel al texto definitivo. Pero si este período de maduración fue de una rapidez casi increíble, aún más enigmática es la evolución del pensamiento de Newton entre 1679, momento en

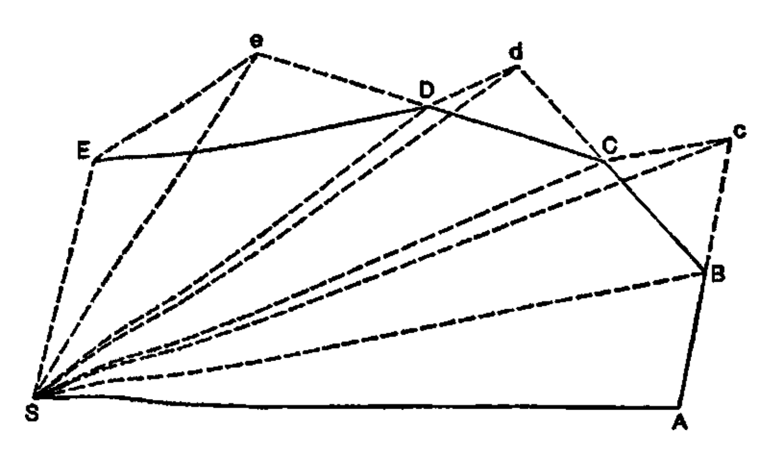


FIGURA 12.1

Demostración newtoniana de la segunda ley generalizada de Kepler

Los triángulos ASB, BSC, CSD son iguales según demuestra la geometría. A los puntos B, C, D se llega después de tiempos sucesivos de igual duración; las líneas Bc, Cd, De son los componentse inerciales del movimiento, iguales respectivamente a AB. BC, CD. Los impulsos (no necesariamente uniformes) hacia el centro S se dirigen a lo largo de las líneas BS, CS, DS y están representados vectorialmente por Cc, Dd, Ee... Las resultantes AB, BC, CD... forman una curva continua y la acción de la fuerza central también se vuelve continua, cuando los elementos del tiempo se vuelven infinitamente pequeños (*Principia*, libro I, proposición 1).

que dejó de contestar a Hooke, y agosto de 1684, momento en que reveló su opinión con tanta confianza a Halley. En una de sus respuestas coléricas sobre Hooke, Newton escribió lo siguiente a Halley:

> Nunca extendí la [inversa] proporción doble [la ley del inverso de la distancia al cuadrado de la gravedad] más baja que a las superficies de la Tierra y antes de cierta demostración que encontré el año pasado [1685] he sospechado que no llegaba suficientemente con exactitud tan abajo: y por lo tanto en la doctrina de los proyectiles nunca la utilicé ni consideré los movimientos de los cielos ...[24]

24. *Ibid.*, II, p. 435. El interés de Newton por los proyectiles, mencionado aquí, se remontaba a 1674; véase Whiteside, *Math. Papers*, VI, 1974, pp. 6-8, y A. R. Hall, *Ballistics in the seventeenth century*, Cambridge U. P., Cambridge, 1952, pp. 120-121.

Desde hace mucho tiempo los historiadores están de acuerdo en que Newton tenía en mente la proposición 71 del libro I de los *Principia* (tal como se numeró finalmente al publicarlos), en donde demuestra el resultado, que sin duda es contrario al sentido común, de que una esfera masiva atrae en puntos inmediatamente adyacentes a su superficie así como en puntos distantes de la superficie como si toda la masa de la esfera estuviese concentrada en su centro; esto, aun cuando las líneas de las fuerzas procedentes de las partículas de la esfera hasta un punto casi tocando su superficie disten mucho de ser mutuamente paralelas. Ésta es la única proposición que Newton destacó por considerarla especialmente esencial para la teoría general de la gravitación, después del descubrimiento de la dinámica de la segunda ley de Kepler, y la correlación de la ley del inverso de la distancia al cuadrado con trayectorias en forma de sección cónica. Y esta proposición 71 en verdad no se encuentra en las primerizas *Proposiciones sobre el movimiento*.[25]

Si Hooke proporcionó el núcleo irritante en torno al cual cristalizaron las ideas nacientes de Newton sobre la mecánica, fue Halley quien ayudó a la purificación de los cristales y los presentó con toda la majestuosidad de los *Principia*. Al principio Newton proyectaba escribir un primer libro teórico muy largo, seguido de un segundo libro que explicaría su aplicación al Sistema del Mundo (más tarde, después de su muerte, el borrador se imprimiría por separado bajo este título). Más adelante, ampliando el tratamiento de la mecánica racional del fluido (cuyo fundador era él), Newton la separó en el libro II, tratando ahora la mecánica celeste de un modo más matemático de lo que al principio pensaba hacer en el libro III. El manuscrito correspondiente a las últimas partes del libro no llegó a manos de Halley, para que lo pasara al impresor, hasta la primavera de 1678.

«Los modernos —escribe Newton en el prefacio de la obra acabada— rechazando formas sustanciales y cualidades ocultas, han procurando sujetar los fenómenos de la naturaleza a las leyes de las matemáticas, [y así] yo he cultivado en este tratado las matemáticas hasta donde se relacionan con la filosofía.» Al hacerlo, sentó principios de física matemática que duraron hasta mediados del siglo XIX. Igualmente hubiera podido escribir que había cultivado la filosofía

25. La importancia que da Newton a esta demostración va dirigida en parte contra Hooke; sin embargo, hubiera podido elegir a otros para el mismo propósito.

en la medida en que servía de fundamento esencial para la física matemática. El libro I empieza con definiciones de los conceptos fundamentales de la mecánica: masa, cantidad de movimiento, inercia, fuerza impresa y fuerza centrípeta. Ahora sabemos lo insatisfactorios que le habían parecido a Newton, ya en una etapa bastante primeriza de su evolución, los conceptos básicos de la naturaleza y el movimiento que había proporcionado Descartes, entre ellos la identificación cartesiana de materia y extensión.[26] En los *Principia* el rechazo por Newton del relativismo cartesiano se hace evidente en el célebre escolio a las definiciones, en donde Newton arguye que el tiempo, el espacio y el movimiento absolutos deben distinguirse de los equivalentes relativos que medimos normalmente; porque él afirmaba que la razón y la estabilidad de la teoría científica requerían por igual la existencia de dimensiones universales e invariables (y que, de hecho, correspondan al carácter universal e invariable del Creador de las cosas): a juicio de Newton, el espacio y el tiempo tienen un ser que es independiente del universo material que existe relativamente dentro de ellos. La distinción entre absoluto y relativo, confundida casi perversamente por Descartes, al modo de ver de Newton, le permitió afirmar la rotación absoluta de la Tierra y los planetas y la fijeza relativa del Sol como centro de sus movimientos, esto es, le permitió ofrecer una prueba de la hipótesis copernicana. Porque la dinámica newtoniana demuestra que el centro de gravedad de todo el sistema solar se halla ubicado dentro del cuerpo del Sol, y, debido a que los planetas exhiben una aceleración centrípeta hacia el Sol, deben estar en movimiento absoluto alrededor de él.

Después de las definiciones vienen las leyes del movimiento y sus corolarios, los principios contingentes de la naturaleza en los cuales se basa la consiguiente teoría matemática. Tanto en el libro I como en el libro III (en las «Reglas de razonamiento») Newton expuso principios explícitos de método científico, pero no menos influyente fue su ejemplificación implícita de una forma de proceder en la ciencia que era a un mismo tiempo teórica y experimental, matemática y mecanicista. La ciencia teórica newtoniana no se vio debilitada por la articulación poco compacta de la filosofía natural cartesiana (toda vez que era reforzada paso a paso por demostraciones geométricas)

26. Véase *De gravitatione* en A. R. y M. B. Hall, *Unpublished scientific papers of Isaac Newton*, Cambridge U. P., Cambridge, 1962, 1978.

ni por la arbitrariedad de la misma (ya que sus conclusiones fueron verificadas mediante experimentos u observaciones). En el libro II, por ejemplo, la velocidad del sonido tal como se había calculado a partir de la teoría del movimiento ondulatorio establecido por Newton, así como de la densidad conocida del aire, 298 m/s, se compara con estimaciones experimentales de la velocidad del sonido que hicieron Newton (utilizando ecos) y, más adelante, Sauveur (empleando tubos de órgano). Aquí, de hecho, había una discrepancia seria de unos 46 m/s que Newton trató de explicar mediante especulaciones *ad hoc*; la verdadera razón la encontró Laplace a finales del siglo XVIII (proposición 50). Ahora bien, en el libro III uno encuentra en el principio mismo la cuidadosa comparación que hace Newton de los tiempos periódicos de los satélites de Júpiter tal como les descubrieron varios observadores, con la tercera ley de Kepler y la teoría gravitacional.

Después de estos preliminares, el grueso del libro I lo ocupan la teoría general de la dinámica y las matemáticas que se necesitan para desarrollarla. Aquí Newton estudia el caso límite de una masa puntual que se mueve bajo la acción de una fuerza, especialmente una fuerza atractiva central, sin compromiso con una teoría física de la fuerza. Aquí, entre otras riquezas, encontramos (libro I, proposición 13) que donde la fuerza central obedece a la ley del inverso de la distancia al cuadrado la órbita descrita por la masa puntual será elíptica, parabólica o hiperbólica; en el libro III se aplicará el segundo caso al movimiento de los cometas (proposición 40). Ciertamente, Newton no conocía esto en 1684, cuando había probado solamente el argumento elíptico kepleriano. Muchas proposiciones del libro I preparan los trabajos matemáticos preliminares para la mecánica celeste que se demuestra en el libro III, pero Newton en modo alguno se ocupa totalmente del caso gravitacional de la ley del universo de la distancia al cuadrado. Demuestra cómo la trayectoria parabólica de los proyectiles de Galileo es un caso especial del funcionamiento de una fuerza constante, y en la sección 14 hace extensiva esta idea a las proposiciones «ópticas» referentes al movimiento de una partícula de luz (como mencionamos previamente).

El libro III demuestra la conformidad de esta teoría dinámica del movimiento con los fenómenos de los cielos, las mareas y la forma de la Tierra. En una ocasión Newton escribió que Kepler «conjeturaba» que las órbitas planetarias eran elipses, queriendo decir

con ello que Kepler había generalizado para todos los planetas las leyes que en realidad había confirmado mediante observaciones sólo en el caso de Marte. Se propuso de manera especial demostrar categóricamente las leyes segunda y tercera de Kepler partiendo de mediciones. En esto tuvo éxito. Ahora también podía confirmar, mediante un cálculo muy exacto, que a la Luna la mantiene en su órbita una fuerza correspondiente a la gravedad terrestre. En muchas otras cosas de su programa, sin embargo, tropezó con dificultades insuperables. Su cálculo teórico de la proporción entre los ejes polar y ecuatorial de la Tierra fue excelente, pero (debido a la falta de información geodésica adecuada) no pudo convencer a todos sus contemporáneos de que el eje polar es geográficamente más corto que el ecuatorial. Este problema no se resolvería de modo decisivo hasta mediados del siglo XVIII, gracias a las expediciones de Maupertuis (en Laponia) y de Bouguer (en el Perú). Igualmente, todo el problema del flujo y el reflujo de las mareas no podía resolverse en unos pocos meses, ni siquiera Newton podía, y (como él mismo reconoció) los rasgos topográficos locales normalmente disfrazan la pauta dinámica general. Los principios, pero no los detalles, de la interacción gravitacional newtoniana entre el Sol, la Luna y el agua oceánica se demostraría que eran correctos. El problema de los tres cuerpos (Sol, Luna, Tierra) que está latente aquí, y que no tenía fácil solución, fue mucho más grave en relación con el movimiento de la Luna misma. Más adelante Newton confesaría que ésta era la única parte de los *Principia* que le había ocasionado dolor de cabeza. El problema de la Luna le molestaría durante unos treinta años, mientras los *Principia* iban cobrando forma en su cerebro; sería la causa de una disputa furiosa y fatal con el Astrónomo Real, Flamsteed, a quien Newton intimidaba sin piedad para que aportase observaciones, y finalmente derrotaría a Newton y quedaría como la única imperfección de los *Principia* que empañaba su gloria, hasta que Clairaut lo eliminó.

El movimiento de la Luna es, en detalle, muy complejo, por lo que el problema de predecir con exactitud su posición en algún momento futuro, o incluso la trayectoria precisa de un eclipse sobre la superficie de la Tierra, es varios grados más difícil que los problemas del movimiento planetario. Ptolomeo conocía dos irregularidades periódicas de su movimiento; Tycho Brahe encontró dos más. En el breve tiempo de que dispuso, y con apenas material adecuado para la observación, Newton difícilmente podía hacer algo más que pro-

meter una teoría dinámica de la Luna en la primera versión de los *Principia* (1687). Entre tal fecha y 1713, momento en que se publicó la segunda edición, luchó implacablemente en pos de un objetivo que él creía, en principio, a su alcance: la creación de un grupo de ecuaciones entrelazadas que, con los parámetros medidos, definirían exactamente los movimientos de la Luna. Tampoco en este empeño le sonrió el éxito, aunque definió otras tres irregularidades, elevando a siete el total de las mismas (para detectar estas tres desigualdades newtonianas se necesitaban instrumentos telescópicos). Tal como dijo el astrónomo francés Lalande medio siglo después, «a Newton le correspondió dar el mayor paso hacia adelante en la teoría de la Luna como en todo lo demás»; sin embargo, el estado de dicha teoría al morir Newton era muy insatisfactorio, incompleto y de apariencia arbitraria tal como él la había dejado. Cuando el matemático Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) se ocupó de la citada teoría en el decenio de 1740 al principio supuso que sólo una modificación de la ley del inverso de la distancia al cuadrado de la gravitación podía hacer que la teoría de Newton fuese compatible con el movimiento observado del apogeo lunar, pero más adelante, después de encontrar un nuevo método de análisis, pudo vindicar plenamente la ley del inverso de la distancia al cuadrado una vez más (*Théorie de la Lune*, 1752).

Clairaut también intervino en la más espectacular de todas las vindicaciones de la astronomía newtoniana: la predicción del regreso del Cometa Halley. En realidad, su paso por el perihelio tuvo lugar el 13 de marzo de 1759, cuando Clairaut lo había predicho para el 15 de abril, retrasado por ligeras revisiones de los cómputos *post facto* al 31 de marzo. Antes de Newton, los cometas, considerados popularmente como los portentos más malignos, habían sido los disidentes de la astronomía filosófica. Kepler había adivinado que viajaban en línea recta por los cielos. Descartes consideraba que se deslizaban alrededor de los bordes de los vórtices estelares, Hevelio y Dörffel sugirieron órbitas de sección cónica, Auzout propuso para un cometa una órbita circular centrada en Sirio. En medio de estas descabelladas especulaciones nadie había propuesto un medio fiable de determinar la trayectoria de un cometa a partir de los lugares observados; el primero en hacerlo fue Newton, aunque en 1681 aún creía que el cometa, antes y después de su mayor aproximación al Sol, eran dos cuerpos distintos, hasta que Flamsteed le convenció de que no era así. La teoría dinámica de Newton dejaba bien claro que

un cometa atraído hacia el Sol desde una distancia inmensa seguiría una trayectoria visible que era imperceptiblemente distinta de una parábola, fuera o no de hecho una elipse elongada. Halley había sido el primero en adivinar que los cometas registrados en diferentes fechas del pasado, si sus elementos resultaban ser más o menos los mismos, podían ser el mismo cuerpo recurrente; emprendió la ingente y dudosa labor de computar sus movimientos característicos a partir de los escasos datos históricos disponibles. En 1705, en su *Sinopsis a la astronomía de los cometas*, arguyó que los cometas vistos en 1531, 1607 y 1682 eran el mismo objeto con un período de unos 75 años (más de dos veces el de Saturno) y predijo su regreso para 1758, aunque era muy consciente de que las masas de Júpiter y Saturno influirían en el movimiento del cometa hasta poner en peligro cualquier estimación más precisa. Éste era el problema que Clairaut había abordado y casi había resuelto, aunque (como esperaba Halley), «la posteridad imparcial no rehusará reconocer que esto fue descubierto por vez primera por un inglés».[27]

Colocar los cometas al alcance de las leyes de la mecánica fue un gran triunfo para Newton. A pesar de ello, los cometas no han dejado de asombrar a la humanidad, y el propio Newton siguió considerándolos como cuerpos misteriosos, envueltos en los destinos de nuestro mundo. Que ninguno de ellos (como él pensaba) chocase contra nuestro globo era una señal de la gobernación divina. Aún más interesantes son las especulaciones físicas sobre los cometas que Newton añadió a su monografía, que no paraba de crecer, sobre sus movimientos observados, empezando por la estimación de que los cometas debían de superar en unas 30.000 veces nuestro calor veraniego debido a su proximidad al Sol (digamos hasta 900.000 °C). Por consiguiente, gran parte de su materia debe volatizarse y las cabezas sólidas deben de retener su calor durante mucho tiempo: un globo de hierro al rojo, del tamaño de la Tierra, dice Newton, apenas se enfriaría (¿hasta qué temperatura?) en 50.000 años (estimación que más adelante tendría interés para los cosmogonistas especulativos). La cola, por lo tanto, «no es nada más que un vapor muy fino que la cabeza o núcleo del cometa emite por su calor» y que asciende

27. A. Armitage, *Edmond Halley*, Nelson, Londres, 1966, pp. 161-167. Halley propuso primero su identificación de este cometa recurrente a la Royal Society en 1696. También propuso un período de 575 años para el cometa de Julio César (44 a.C.)-531, 1106, 1680, 2255 d.C. (*Principia*, 1726³, p. 501).

desde el Sol por una especie de repulsión, como deben hacer todos los humos y vapores (al menos eso alega Newton, sin explicación alguna). Este vapor enrarecido debe difundirse por todos los cielos, verse atraído hacia los planetas por las gravitaciones de éstos y mezclarse con sus atmósferas, ya que

> para la conservación de los mares y fluidos de los planetas, parece que se requieren cometas que, de sus exhalaciones y vapores después de la condensación, la disminución de los fluidos planetarios dedicados a la vegetación y putrefacción y así convertidos en tierra seca, pueda ser suplida continuamente y completada ... y de aquí que el volumen de la tierra sólida sea incrementado continuamente, y los fluidos, si no son suministrados desde fuera, deben estar en continua disminución y finalmente acabar del todo. Sospecho, asimismo, que es principalmente de los cometas de donde procede el espíritu, que es en verdad la más pequeña pero la más sutil parte de nuestro aire, y tan necesaria para sostener la vida de todas las cosas entre nosotros.[28]

¿Quién iba a imaginar que el mismo autor que sólo unas páginas más adelante escribiría la frase inmortal «Yo no invento hipótesis» vincularía aquí, en el primer bosquejo de astronomía química jamás escrito, el experimento de Van Helmont y Boyle con el sauce, junto con la hipótesis de Sendivogius sobre el nitro aéreo, a la cuestión de la constitución de las colas de los cometas?

Sin embargo, no hay duda de que la consecuencia de los *Principia* para la teoría del universo que más sorprendió a los contemporáneos fue el ataque que lanzó Newton contra la teoría etérea de los vórtices que a la sazón imperaba. Aquí es donde más absoluta se hizo la antítesis entre la atracción de Newton y las hipótesis cinemáticas de los neocartesianos, aunque Newton no insistió en ello, limitándose a comentar: «La hipótesis de los vórtices tropieza con muchas dificultades». Su propio sistema dinámico del mundo no requería retórica para su defensa, pues en la última parte del libro II de los *Principia* Newton había demostrado que un vórtice solar continuo era totalmente incompatible con las leyes del movimiento planetario de Kepler.

28. *Principia*, 1726, pp. 515-516. Al parecer, Newton escribió esta versión ampliada de la teoría física de los cometas cuando terminó el *System of the world*. Se encuentra en el manuscrito del impresor del libro III de los *Principia*.

En el libro II las matemáticas son más difíciles que en el libro I incluyendo la única proposición en todos los *Principia* (sobre la forma del sólido que encuentra menor resistencia) para la cual Newton no pudo encontrar ninguna demostración sintética. Todo ello tiene que ver con los fluidos; pero los diversos problemas principales no están relacionados (resistencia, flujo, movimiento ondulatorio, la ley de Boyle, sonido, vórtices) y, tal como ha señalado Truesdell, la visión newtoniana de un fluido —para propósitos matemáticos— no es congruente; «Casi todos los resultados son originales —comenta— y, excepto unos pocos, son correctos». Quizás esto no debería sorprender a nadie, ya que no existía ninguna mecánica racional del fluido antes de Newton, aparte de la hidrostática; ni siquiera otro siglo de trabajos a cargo de matemáticos geniales, que edificaron sobre los cimientos de Newton, logró resolver satisfactoriamente todos los problemas que él había abordado.[29] El movimiento de un fluido vortiginoso se comenta brevemente en la sección IX. Newton supone que la resistencia debida a la viscosidad de un fluido aumenta con la velocidad y supone también que la extensión del fluido es infinitamente grande: entonces prueba que los tiempos periódicos de las porciones de fluidos en el vórtice —o de los cuerpos transportados en el fluido del vórtice, obviamente— serán como los cuadrados de los radios al centro. Pero en el universo son siempre como la potencia 3/2 de la distancia. Por consiguiente, los planetas no podrían ser transportados en semejante vórtice fluido. Newton había logrado lo que todos sus predecesores no habían podido hacer: un modelo matemático de un vórtice fluido que, según él, podía ser confirmado mediante pruebas en agua profunda. De haber podido idear alguien otro modelo, un modelo que se ajustase a las leyes de Kepler, hubiese sido posible argüir que el vórtice etéreo celeste era de *esta* clase, no como el modelo de Newton. Nadie dio este paso. En vez de ello, dos años después de la publicación de los *Principia* (pero sin haber leído aún más que una reseña completa del libro de Newton) Leibniz se propuso evitar las críticas de Newton dividiendo el vórtice en capas separadas, deslizándose unas sobre otras sin fricción ni viscosidad y cada una conteniendo un planeta.[30] Éstas eran esferas ptolemaicas,

29. Clifford Truesdell, «Rational fluids mechanics, 1687-1765», introducción del editor a *L. Euleri Opera Omnia*, ser. II, XII, Orell Füssli, Zurich, 1954, p. XII.
30. G. W. Leibniz, «*Tentamen de motuum coelestium causis*», *Acta Eruditorum*, febrero de 1689, ensayo que Newton criticó vehementemente. E. J. Aiton, *The vortex*

fluidas en vez de sólidas. Parece, visto desde nuestra perspectiva, un mecanismo extrañamente complejo y nada plausible como medio elegido para salvar el mecanismo del universo de la amenaza destructiva de la atracción.

Tras la muerte de Newton prosiguieron durante mucho tiempo los esfuerzos, ingeniosos aunque engorrosos, encaminados a salvar los vórtices. Ciertamente, ninguno de ellos podía hacer frente a la otra objeción directa y obvia que Newton había hecho contra ellos, basada en su dinámica y apoyada por la observación:

> Los movimientos de los cometas son sobremanera regulares, son gobernados por las mismas leyes que los movimientos de los planetas, y de ninguna manera pueden explicarse por medio de la hipótesis de los vórtices; porque los cometas son transportados con movimientos muy excéntricos a través de todas las partes de los cielos indiferentemente, con una libertad que es incompatible con el concepto de un vórtice.[31]

Tal vez podamos vincular a los argumentos contrarios a los vórtices la prueba dinámica newtoniana de que el sistema copernicano es físicamente verdadero: el centro de gravedad de todo el sistema solar está muy dentro del cuerpo del Sol, y, por ende, los planetas giran alrededor del Sol. Al final del escolio sobre el espacio y el tiempo Newton había insistido en la importancia que para la filosofía tiene distinguir los movimientos reales de los aparentes, cosa que (en el caso del sistema solar) le permitía hacer su análisis. Su insistencia va dirigida contra Descartes, quien, valiéndose de un ingenioso sofisma, había librado formalmente su sistema de una posible condena procopernicana por parte de la autoridad. Desde hacía tiempo este tratamiento despreocupado de una cuestión seria irritaba a Newton, que no tenía nada de relativista. En su tratado «Sobre la gravitación y el equilibrio de los fluidos», obra de juventud que no se publicó y que, de haberlo terminado, tal vez habría incluido consideraciones sobre la teoría del vórtice, Newton escribió:

---

theory of planetary motion, Macdonald, Londres y Nueva York, 1972; Westfall, *Force in Newton's physics*, pp. 308-310.

31. Comienzo del escolio general con que concluyen los *Principia* (añadido a la 2.ª ed., 1713).

> Difícilmente es consecuente el filósofo que utilice como base de su filosofía el movimiento de lo vulgar que había rechazado un poco antes, y ahora rechaza ese movimiento por considerar que no sirve para nada, lo cual sólo se decía antes que era verdadero y filosófico, de acuerdo con la naturaleza de las cosas.[32]

Esta crítica es fundamental. Si Descartes, dice Newton en el pasaje, opta por tratar el movimiento en términos exclusivamente relativos, como si no tuviera trascendencia el que la Tierra esté o no en reposo en el centro del universo, ¿se le puede considerar como un filósofo serio del movimiento? Los *Principia* demostrarían de forma matemáticamente detallada que no podía considerársele como tal.

En la decimocuarta de sus *Cartas sobre la nación inglesa* (1734) Voltaire, al hacer una lista de las creencias opuestas que se albergaban en París y Londres, indicaba, además de la forma de la Tierra y el asunto de los vórtices, la cuestión del *plenum* y del vacío: del primero eran partidarios Descartes y los neocartesianos Huygens, Malebranche y Leibniz; del segundo, los newtonianos. Estos últimos, como acabamos de ver, confirmaron su adhesión al universo fluido en 1689, Huygens lo haría en su *Discurso sobre la gravedad* y en su *Traité de la lumière* del año siguiente. No cabe ninguna duda de su postura y mientras duró el neocartesianismo duró también su confianza en el universo lleno de éter, el cual, huelga decirlo, resucitaría con la victoria de la teoría ondulatoria de la luz en el siglo XIX. La postura de Newton y sus seguidores es más oscura. Eterista también antes de embarcarse en la dinámica de los *Principia*, el éxito que obtuvo con una filosofía matemática de las fuerzas de la naturaleza indujo a Newton a abandonar los mecanismos etéreos por considerarlos especulaciones hueras, inútiles. Si el espacio estaba o no realmente vacío o si en realidad contenía alguna forma extremadamente enrarecida de materia era una cuestión que el físico matemático podía permitirse pasar por alto; podía tener la confianza de que el espacio ciertamente no estaba lleno de ninguna clase de fluido denso capaz de resistir los movimientos de los cuerpos celestes. Esta observación la hizo claramente Newton en el libro III, proposición 10: a una altura de 320 kilómetros sobre la superficie de la Tierra, Newton calcula (utilizando el libro II, proposición 22) que la densidad de la atmósfera es tan reducida que el planeta Júpiter, al atravesarla,

32. Hall y Hall, *op. cit.* (en nota 26), p. 124.

perdería únicamente una millonésima parte de su movimiento en un millón de años. Pero, «estando las regiones celestes perfectamente vacías de aire y exhalaciones», los cuerpos celestes no encuentran, de hecho, ninguna resistencia y continúan sus movimientos durante una inmensidad de tiempo.

¿Podía haber, a pesar de todo, un éter efectivo capaz de impeler los cuerpos físicos en este espacio vacío de aire y exhalaciones? ¿Cómo sería este éter? ¿Sería capaz de impeler los cuerpos tanto como de no ofrecerles resistencia? Muchos hombres eminentes se estrujarían inútilmente el cerebro tratando de resolver semejantes problemas; Newton, no. En 1692, sin embargo, apremiado por el filósofo Richard Bentley, que más adelante sería el director del «college» del propio Newton, éste tuvo que afrontar directamente las consecuencias de su negación del éter. Al principio Bentley creía que Newton pensaba que la gravitación era esencial para la materia e inherente a ella. Newton le aseguró que no era así, que lo único esencial para la materia era su propia inercia; en «cuanto a la causa de la gravedad, es lo que no pretendo saber, y, por consiguiente, necesitaría tiempo para considerarla». Asimismo, la idea de la gravedad inherente parecía entrañar, como dijo Newton, «que un cuerpo actuaría sobre otro a cierta distancia a través de un vacío, sin la medición de nada más por lo cual y a través de lo cual su acción y su fuerza puedan ser transportadas del uno al otro», y tal acción material a distancia era (declaró Newton a Bentley) «un absurdo tan grande, que creo que ningún hombre que tenga en las cuestiones filosóficas una facultad competente para pensar puede caer en ella».[33]

¿No es esto un callejón sin salida? Por un lado Newton dice que no puede existir ningún medio etéreo ni, es de suponer, ninguna clase de mecanismo material que ocupe los espacios celestes; por otro lado, califica de absurda la existencia de fuerza gravitacional dentro de un vacío sin «mediación» entre las masas. Algunos amigos de Newton opinaban que lo que trataba de decir era que, como Dios es omnipresente, Él es la causa de que en todas partes la fuerza gravitacional funcione entre los cuerpos; Fatio de Duillier, el único newtoniano que en vida de Newton expresó una hipótesis etérea para la gravedad, hipótesis que él creía aprobada por Newton, sin

33. I. Bernard Cohen, *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1958, 1978, pp. 298, 302.

embargo, añadió: «aunque a menudo parecía inclinarse a pensar que la gravedad tenía su fundamento sólo en la arbitraria voluntad de Dios». Como mínimo otro newtoniano, David Gregory, también afirmó que éste era el punto de vista de Newton. Cuadra con la idea que sin duda él albergaba de que la «materia» es sencillamente «espacio» dotado por Dios de las propiedades de impenetrabilidad, inercia, etcétera. Los pasajes finales de las versiones definitivas de *Opticks* y de los *Principia* dejan claro como el cristal que Newton no podía concebir al Creador meramente como una persona histórica. Para él la Creación no era un acontecimiento en el tiempo, hecho y terminado, después del cual el universo funcionaría como un reloj al que le hubieran dado cuerda; creía que Dios desea constantemente, a través del tiempo, la existencia del universo y que lo gobierna como Providencia. Cuando esta creencia llegó a sus oídos Leibniz se burló de Newton como si éste fuera alguien que veía en la naturaleza un milagro perpetuo o en Dios un trabajador imperfecto que se pasara la vida remendando su obra.[34] Los newtonianos replicaron que en la religión era necesario considerar perpetuamente el universo como criatura de Dios y que un milagro era una desviación del curso normal ordenado por Dios.

Newton entregó a su amigo Samuel Clarke, teólogo,[35] la dirección de estas cuestiones metafísicas de altos vuelos. Ilustran el peligro, así como la necesidad (en aquella época) de la creencia newtoniana de que hablar de Dios es propio de la filosofía natural. Al final no aportaron ninguna forma de escapar del callejón sin salida de Newton, pues reconocer públicamente que la voluntad de Dios era la única explicación de la gravedad era (pese a todas sus protestas) admitir los otros defectos de aducir «causas ocultas», esto es, admitir desesperadamente que la causa de la gravedad rebasaba los límites de la filosofía natural. Otros newtonianos se mostraron menos inclinados a la metafísica que el propio Newton, entre ellos Roger Cotes (1682-1716), que se hizo cargo de la segunda edición de los *Principia*,[36] donde, en el prefacio explicativo que le persuadieron a incluir, declaró francamente

34. Hall, *op. cit.* (en nota 7), cap. 10. A. Koyré, *From the closed world to the infinite universe*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1957.
35. H. G. Alexander, *Leibniz-Clarke correspondence*, Manchester University Press, Manchester, 1956.
36. A. Rupert Hall, en *Proc. R. Soc. London A*, 338 (1974), pp. 397-417.

> o bien la gravedad debe tener un lugar entre las cualidades primarias de todos los cuerpos, o la extensión, la movilidad y la impenetrabilidad no deben. Y si la naturaleza de las cosas no la explica correctamente la gravedad de los cuerpos, no la explicarán correctamente su extensión, su movilidad y su impenetrabilidad.

No sabemos qué pensó Newton de esto, pero ciertamente los amigos habían aconsejado a Cotes que moderase sus opiniones al respecto antes de que se imprimiera el prefacio. De hecho, el tiempo estaría de su parte: los físicos matemáticos de finales del siglo XVIII se dieron por satisfechos pensando en la gravitación de esta manera pragmática, como un fenómeno universal de la naturaleza, de hecho, como una constante universal cuya magnitud puede analizarse, sin buscar ninguna causa, física o metafísica, detrás de la gravitación.

El título de la obra maestra de Newton, *Los principios matemáticos de la filosofía natural*, deberíamos leerlo en el sentido más sencillo y más literal, sin olvidar las aspiraciones expresadas por el autor en su prefacio (y de modo aún más completo en los borradores rechazados)[37] a hacer generalmente extensiva la teoría matemática de las fuerzas y los movimientos a ramas de la filosofía que no había abordado en dicho libro. El tema de Newton no era la mecánica simplemente racional o celeste, y la gravitación distaba mucho de ser la única fuerza que tenía en mente. Los problemas en apariencia dispares a los que Newton daría una solución sintética no procedían sólo de Kepler y Galileo, sino también de Descartes. Si la importancia de Descartes para la evolución intelectual del joven Newton fue minimizada por éste en sus años de madurez, así como silenciada por sus sucesores, los eruditos modernos la han redescubierto, señalando que incluso el título de los *Principia* es una reminiscencia de los *Principia philosophiae* de Descartes. No cabe la menor duda de que Newton no pretendía sustituir la visión cinemática de la naturaleza por una visión dinámica meramente en lo que respecta a los espacios celestes, sino que salta a la vista que pretendía que esta transformación tuviese validez universal. En los *Principia* la responsabilidad de extender la visión dinámica más allá de la gravitación recae en el libro II, donde, además, Newton recurre sutilmente a la experimentación cuantitativa, haciendo que corra pareja, para los mismos fines y de ilustración y verificación, con el empleo de datos astronómicos y geodésicos en el

37. Hall y Hall, *op. cit.* (en nota 26), pp. 305-308.

libro III. Entrando en la teoría de los fluidos, mostrando con cuánta precisión podía confirmarse la teoría del movimiento en los fluidos mediante experimentos sobre la oscilación de los péndulos o la caída de los cuerpos pesados en el aire o en el agua, trasladó su discurso del mundo matemático de las abstracciones al mundo real de la física. En sucesivas ediciones del libro Newton se tomó la molestia de mejorar los datos objetivos citando experimentos realizados por otros. Con una finura creciente, y tal vez demasiado preocupado, Newton intentó demostrar que el modelo científico de la naturaleza se ajustaba con tanta exactitud como se deseara a los fenómenos medidos cuando se basaba en principios matemáticos y utilizaba parámetros elegidos correctamente y determinados con precisión.[38] En el libro II, proposición 50 de la segunda edición, Newton se esforzó demasiado por ajustar el valor calculado para la velocidad del sonido en el aire a la última determinación experimental efectuada por Joseph Sauveur (1653-1716), ajuste que llevaba aparejadas suposiciones físicas arbitrarias que no hubieran podido cuantificarse aun en el caso de ser correctas. De hecho, como probaría Laplace, la derivación dinámica de la velocidad del sonido en esta proposición era perfectamente correcta (a 298 m/s) y cuando se tienen debidamente en cuenta efectos termodinámicos cuya existencia Newton no sospechaba, esta cifra puede elevarse hasta la altura de los valores experimentales.

En el caso de Galileo, la concordancia entre la expresión matemática y el mundo de la experiencia había existido sólo en principio, por así decirlo, mientras los factores físicos que obstruían y complicaban la elegancia de un universo sencillamente geométrico se habían resistido a su análisis y cálculo. Newton demostró que por medio de sucesivas aproximaciones era posible incluirlos todos en los términos de una teoría exhaustiva. Nuestro universo no puede ser el universo platónico ideal que suponían Galileo y Kepler:

> En cada uno de sus giros un planeta traza una nueva órbita, como hacen también los movimientos de la Luna, y cada órbita depende de los movimientos combinados de todos los planetas, por no mencionar la acción de unos sobre otros. A menos que yo esté muy equivocado, sería superior a la fuerza del ingenio humano

38. R. S. Westfall, *Never at rest*, Cambridge U. P., Cambridge, 1980, pp. 733-739.

> considerar tantas causas de movimiento al mismo tiempo, y definir los movimientos por medio de leyes exactas que permitieran un cálculo fácil.[39]

El rico y complejo universo en el que habitamos, sin embargo, puede analizarse matemáticamente: Newton pretendía que esto era cierto, en lo referente a toda la gama de fenómenos, no sólo extensiva, sino también intensivamente, del microcosmos al macrocosmos.

No hay duda de que esta idea está implícita en las reglas del razonamiento así como en muchas proposiciones matemáticas de los *Principia* (donde el paso de partículas a cuerpos brutos corresponde al paso de lo infinitesimal a lo integral) y en numerosos pasajes externos, en especial en las cuestiones de *Opticks*. Lógicamente, la mecánica celeste requería un fundamento en la mecánica racional: sólo así podría convertirse, como era debido, en una rama de la filosofía natural. También en este aspecto Newton y Descartes se parecían más de lo que daba a entender la tosca antítesis de sus respectivas filosofías. En sus *Principia philosophae* Descartes había partido de sus ideas claras de lo que debe haber en el mundo a través de las leyes del movimiento y las propiedades de los cuerpos móviles hasta llegar a su máquina celeste. Newton hizo lo mismo: desarrollar su método matemático a partir de las definiciones y las leyes, a través de la larga serie de análisis de los movimientos de los cuerpos en numerosas condiciones distintas, hasta que finalmente pudo discernir en los movimientos celestes casos especiales de los principios del movimiento que él ya había elucidado. Así, por un lado, la teoría de la gravitación universal adquirió respetabilidad intelectual por medio de su relación deductiva con una filosofía de la dinámica universal de la naturaleza, mientras que, por el otro, esta filosofía adquirió sustancia derivada de la experiencia y confirmación cuantitativa de su relación inductiva con la astronomía. De no ser por esta última relación, la filosofía dinámica habría sido meramente especulativa; de no haber sido por la primera relación, la teoría de los planetas habría sido tan fenomenalista como el «principio de la atracción superviniente» de Hooke.

¿Qué puede decirse de *Opticks* en este sentido? En primer lugar, el contraste inherente entre el aspecto de la mente científica de New-

39. Hall y Hall, *op. cit.* (en nota 26), p. 281.

ton que este libro revela y el que se discierne en los *Principia* puede exagerarse aun cuando posteriores newtonianos fueran conscientes de heredar una tradición dual. Al igual que los *Principia*, *Opticks* empieza con axiomas y continúa con proposiciones a la manera euclidiana, aunque Newton promete que éstas deben probarse «mediante la razón y experimento»; sin embargo, en sus conferencias universitarias de 1670-1672 Newton había tratado el mismo terreno de una manera geométrica mucho más tradicional para satisfacer su propio «deseo de crear una teoría matemática avanzada de los fenómenos ópticos (en vez de describir meramente los efectos observados)».[40] El cambio de estilo entre las *Conferencias ópticas* y *Opticks*, al igual que el cambio de estilo entre el libro III de los *Principia* y el *Sistema del mundo*, es fruto de un norma de actuación más que de una diferencia de contenido o de método. En segundo lugar, como ya hemos señalado, sin duda Newton albergaba la esperanza de crear una mecánica óptica que fuera el puente entre la óptica geométrica y la física, de haber estado a su alcance construir tal puente. Si hubiese madurado, habría sido el «libro IV» de los *Principia*. En cuarto lugar, no debemos pasar por alto las cuestiones que hay en *Opticks*, el último y más enigmático testamento científico de Newton, que se deben al hecho de que el libro no está completo «como no he terminado esta parte de mi proyecto [relativa a la difracción] concluiré proponiendo únicamente algunas cuestiones, con el fin de que otros sigan buscando». Las cuestiones establecen un firme vínculo entre *Opticks* y los *Principia*, en especial la cuestión 29, en la que Newton pregunta:

> ¿No son los rayos de luz cuerpos muy pequeños emitidos por las sustancias luminosas? ... las sustancias relúcidas actúan sobre los rayos de luz a distancia al refractarlas, reflejarlas y someterlas a inflexión y los rayos agitan mutuamente las partes de esas sustancias a distancia para calentarlas; y esta acción y reacción a distancia se parece mucho a una fuerza atractiva entre cuerpos. Si la refracción fuera ejecutada por atracción de los rayos, los senos de incidencia deberían ser a los senos de refracción en una proporción dada, como demostramos en nuestros principios de la filosofía: y esta regla es verdadera por experiencia.

40. Cambridge University Library, *The unpublished first version of Isaac Newton's Lectures on Optics*, 1973, Introducción.

Por supuesto, en esta última frase Newton alude a la sección XIV del libro II de los *Principia*, cuyas proposiciones, que no son del todo apropiadas, quedarían para siempre como la única indicación publicada de lo que hubiese podido ser tal mecánica óptica. En la misma cuestión dio unos toques nuevos a la idea que relacionaba el color con el tamaño de la partícula de luz (como vimos antes) y sugería que las partículas «mediante sus poderes atractivos, o alguna otra fuerza» crean vibraciones en aquello sobre lo que actúan, creando así las «convulsiones» responsables de los anillos de Newton.

De hecho, Newton se extendió entonces en especulaciones cualitativas. En la cuestión 31, donde se ocupaba con cierto detenimiento de la última de las fuerzas, entre partículas, consideradas con algún detalle, la «atracción» se convierte en una idea casi tan general como la «forma» lo había sido para Descartes. Aparecen tres ideas generales: primeramente, hay agentes en la naturaleza capaces de hacer que las partículas de los cuerpos se peguen unas a otras mediante atracciones muy fuertes. Y es la tarea de la filosofía experimental encontrarlas.

Lo importante es que debemos suponer que todos los cuerpos físicos se componen de distintas clases de partículas unidas por estas poderosas atracciones de corto alcance: el cambio químico es el proceso por medio del cual estas atracciones (y, por ende, las combinaciones) se modifican. En segundo lugar, Newton supone que en la materia puede haber una estructura ordenada:

> ... las partículas de materia más pequeñas pueden adherirse por efecto de las atracciones más fuertes, y componer partículas mayores de virtud más débil; y muchas de éstas pueden adherirse y componer partículas mayores cuya virtud es todavía más débil, y así durante diversas sucesiones, hasta que la progresión termina en las partículas más grandes de las cuales las operaciones de la química, y los colores de los cuerpos naturales dependen, y que, adhiriéndose, componen cuerpos de sensible magnitud.

En un borrador Newton daba más explicaciones sobre esta idea y la relacionaba con la estructura del cristal: las partículas no se unen al azar «formando montones», sino que, al igual que «la nieve y las sales, se unen formando figuras regulares. De las partículas más pequeñas se forman otras mayores, y de éstas las más grandes, todas en una estructura reticular». Si las fuerzas atractivas se debilitan a

medida que aumentan los conjuntos de partículas, también exhiben una variación cualitativa, y este principio de la afinidad variable es la tercera de las ideas de Newton sobre la estructura de la materia, copiosamente ilustrada por medio de ejemplos químicos en la cuestión 31.

> Cuando sal de tártaro *per deliquim*, siendo vertida en la solución de cualquier metal, precipita el metal y lo hace caer al fondo del licor en forma de barro: ¿Acaso no arguye esto que las partículas ácidas son atraídas más fuertemente por la sal de tártaro que por el metal, y en virtud de la atracción más fuerte van del metal a la sal de tártaro?

De hecho, Newton da a entender que la variación cualitativa es capaz de recorrer toda la distancia que separa lo positivo de lo negativo, de modo que puede haber fuerzas de corto alcance repulsivas además de atractivas; asimismo, sugiere que en el caso de los fenómenos ópticos puede que actúe alguna fuerza bipolar como el magnetismo.

He aquí una visión espléndida y polifacética. Newton tuvo que dejarla como tal en su *Opticks*, como la había dejado en el largo Prefacio a los *Principia* que le rechazaron en 1687. Allí «preguntaba si había o no muchas fuerzas de esta índole, jamás percibidas aún, por medio de las cuales las partículas de los cuerpos se agitan unas a otras y se unen formando varias estructuras». Si fuera posible conocer más cosas sobre tales fuerzas, entonces la visión dinámica de la naturaleza podría extenderse con firmeza mucho más allá de la teoría de la gravitación, limitada esencialmente a las grandes masas:

> Pues si la Naturaleza es sencilla y está a gusto consigo misma, operarán causas de la misma manera en todos los fenómenos, de modo que el movimiento de cuerpos más pequeños puede depender de ciertas fuerzas más pequeñas del mismo modo que los movimientos de cuerpos más grandes son gobernados por la fuerza más grande de la gravedad. Porque si todos los movimientos naturales pueden explicarse mediante tales fuerzas, no quedará otra cosa que hacer salvo investigar las causas de la gravedad, de la atracción magnética y de las otras fuerzas.[41]

41. Hall y Hall, *op. cit.* (en nota 26), pp. 306, 307.

Éste fue el magnífico programa de investigación filosófica y experimental que Newton legó a la posteridad; volveremos a ocuparnos de él en el último capítulo del presente libro.

Newton debió percatarse claramente de que el problema de tratar en términos de dinámica de partículas las transformaciones efectuadas en los experimentos químicos debía ser muy distinto de los problemas que resolvería en relación con la gravitación. Mucho antes de su muerte los fieles seguidores de la filosofía newtoniana habían hecho dos intentos de encajarla aún más en la química. El primer intento fue el de John Keill (1671-1721), competente matemático que sería abogado de Newton en la disputa con Leibniz en torno a la invención del *calculus*, y que publicó un trabajo casi matemático sobre las atracciones químicas en las *Philosophical Transactions* correspondientes a 1708, esto es, dos años después de que Newton las introdujese por vez primera en la *Optice* latina de 1706.[42] A pesar de algunas remisiones a los *Principia*, los «teoremas» de Keill no son nada más que una combinación del concepto newtoniano de la afinidad variable con la idea cartesiana del tamaño y la forma variables de las partículas; así, su teorema 18:

> El tamaño de un cuerpo más denso que el agua puede disminuir tanto que al final quedará suspendido en el agua y no descenderá bajo la fuerza de su propia gravedad. De esto resulta la razón por la cual las partículas de sal o metálicas y otras de la misma clase, reducidas a tamaños más pequeños, permanecen suspendidas en sus solventes.

Esto da la impresión de ser un ejercicio hipotético, vacío y sin sentido, que nadie utilizó jamás eficazmente. No es mucho más lo que puede decirse en relación con las *Chymical lectures* (1709) del médico John Friend (1672-1728), «en las cuales» el título continúa, «casi todas las operaciones de la química son reducidas a sus verdaderos principios, y las leyes de la naturaleza». Es cierto que Friend sí explicó la destilación, la fermentación, la precipitación y todos los demás procesos químicos de nombre técnico mediante combinaciones y permutaciones de las ideas de la cuestión 31, pero, aparte de enriquecer la ejemplificación, no puede decirse que el lector fuese más

42. *Phil. Trans.*, 26 (1708), pp. 97-110.

sabio después de leer el libro, ni que estuviera más cerca de descubrir la naturaleza de las fuerzas no gravitacionales sobre las que escribiera Newton. No es de extrañar que esta producción dudosa pero newtoniana fuera objeto de una crítica devastadora por parte de Leibniz.

De hecho, la naturaleza, como sabemos, está menos a gusto consigo misma de lo que Newton suponía para la homología entre fuerzas a gran escala y fuerzas a pequeña escala que él imaginaba que no existe. Y aunque su orden de que en el futuro se investigase más minuciosamente la naturaleza de las fuerzas tal vez surtió algún efecto inmediato en los estudios de electricidad que tanto interesaron a Newton en sus últimos años, resultaría ajeno al progreso de la química. Del mismo modo que, en el siglo XVIII, «la filosofía natural experimental» se distinguiría cada vez más, por su carácter independiente, de la «filosofía matemática», también se apartaría, por lo menos con el mismo rigor, de la «teoría de la materia», que se iba convirtiendo cada vez más (entre los últimos posnewtonianos como Boscovich y Priestley) en tema de especulación filosófica, el equivalente newtoniano del neocartesianismo. No por última vez, en 1726 Newton parecía haber puesto toda la ciencia física al alcance de los matemáticos; no por última vez —¡piensen en Faraday o Rutherford!— la teoría física se escaparía del abrazo.

Capítulo 13

EL ALCANCE DE LA VIDA

El estudio biológico, tal como se sigue hoy en laboratorios y sobre el terreno, es esencialmente una creación del siglo XIX. La labor de Darwin sobre la evolución, la de Mendel sobre genética, la de Schleiden y otros sobre la teoría celular transformaron de tal manera la estructura del pensamiento del biólogo que sería apropiado atribuir al período 1830-1870, más que a cualquier otra época anterior, la «revolución biológica» que vino a completar la perspectiva científica moderna. Creer en la fijeza de la especie no era menos respetable que creer en la fijeza de la Tierra; creer que Dios atendió personalmente a la fabricación de todos los tipos de diatomeas y zarzales no era menos primitivo y animista que creer que sus ángeles gobernaban las revoluciones de las orbes planetarias. Exactamente del mismo modo que la filosofía mecanicista del siglo XVII fue acusada de fomentar el escepticismo y la irreligión, a mayor escala (porque el asunto era más claro y más decisivo) sobre los biólogos mecanicistas del siglo XIX cayó con su fuerza la ira eclesiástica. La libertad del científico de dirigir sus teorías de acuerdo sólo con los datos científicos estaba igualmente en juego. Pero hay una diferencia. La biología era ciertamente «moderna» —en algunos aspectos, aunque no en todos— antes del siglo XIX. Ya había tenido lugar un gran renacimiento que en sí mismo superaba todo lo anterior. Existía un cúmulo de materiales que podían utilizarse para hacer una gran generalización como, por ejemplo, la evolución. Sobre todo, el método científico de la biología ya existía —eso no fue una creación del siglo XIX—. Las investigaciones de Leeuwenhoek y Malpighi, la sistemática de Ray y Linneo, fueron preliminares tan esenciales para las síntesis que introdujo la

perspectiva verdaderamente moderna como la obra de Copérnico y Galileo lo fue para la de Newton.

A ninguno de los fundadores antiguos de la biología le interesaban principalmente la recogida, la descripción y la clasificación como fines en sí mismas. Aristóteles el zoólogo y Teofrasto el botánico fueron siempre filósofos: su propósito era investigar el funcionamiento de los organismos vivos; Dioscórides estudiaba la botánica como auxiliar de la medicina. Debido quizás en parte a que la gama de especies examinadas era relativamente pequeña —ni Aristóteles ni Teofrasto conocían más de unas quinientas clases distintas de animales o plantas—, el problema de catalogarlas no adquirió una importancia decisiva, aunque se tenían muy en cuenta el orden y la distribución. Como el imperio griego llegaba hasta la India, se disponía de especies exóticas, pero no atraían mucha atención. Para la mente griega el intento de responder a las preguntas que planteaba la naturaleza viva era más importante que la recopilación de información, y para esto había suficiente con los materiales que estaban a mano. Pues bien, si damos un gran salto en el tiempo, durante el último siglo ciencias tales como la taxonomía han vuelto a quedar reducidas a simples ramas especializadas de la biología. El estudio de la función, de los procesos de crecimiento y diferenciación, ha adquirido una importancia más fundamental. El método experimental ha suplantado al enciclopédico, de modo que un zoólogo moderno encontrará más interesantes las obras de Aristóteles que las de cualquier otro historiador de la naturaleza anterior a Darwin.

A decir verdad, el período intermedio tiene características muy especiales. Durante mucho tiempo no hubo ningún digno sucesor de los botánicos griegos del siglo IV a.C. Los romanos escribían con competencia sobre agricultura, pero un autor como Plinio no añadió nada —más allá del culto a las maravillas— a los textos que él saqueó. El espíritu filosófico de los griegos casi pereció y no resucitaría hasta la obra botánica de Alberto Magno (*De vegetabilibus et plantis*, *c.* 1250). Alberto era un botánico aristotélico; al menos su principal autoridad era una traducción de dos libros sobre las plantas que a la sazón se atribuían a Aristóteles.[1] Le interesaban la filosofía del crecimiento de las plantas, la variedad de sus estructuras y (según él creía) sus mutaciones constantes. El cuidado en el análisis morfológico de

1. Atribuido actualmente a Nicolás de Damasco, siglo I a.C.

las plantas para fines de descripción e identificación se combinaba con una atención renovada al problema de la clasificación, pero a Alberto no acabó de convencerle la importancia de la catalogación. Esa importancia era entonces poco corriente, pues en tiempos de Alberto el arte del herbolario —la botánica médica— ya era objeto de mucho interés.

Los herbolarios tenían por modelo a Dioscórides en vez de a Aristóteles y Teofrasto. Antes de la caída de Roma la tradición que él fundó ya había sufrido degradación, y la decadencia, tanto en materia como en ilustración, continuó durante toda la alta Edad Media. En el siglo XIII, sin embargo, ya había herbolarios hábiles que poseían un buen conocimiento de Dioscórides y de sus comentaristas, cierta familiaridad con drogas exóticas e interés por la descripción y la identificación. El herbario de uno de ellos, Rufinus, sirve para demostrar que él, cuando menos, no vacilaba en añadir comentarios propios a la tradición literaria, y que era consciente de distinciones en especie que desconocieron los recopiladores del siglo XVI, más famosos que él. Es evidente que Rufinus conocía bien las plantas medicinales y los herbolarios, pero nunca intentó clasificarlas, limitándose a poner sus notas en orden alfabético. La mayor parte de su texto lo componían citas de anteriores autoridades farmacológicas (Dioscórides, el *Circa instans* de alrededor de 1150, las *Tablas* de Salerno, y otras).

El herbario floreció y se hizo enormemente popular poco después de inventarse la imprenta. Pero el interés del herbolario por la planta se debió siempre a que era un medio de llegar a un fin. Algunos de sus medicamentos eran minerales o derivados de fuentes animales, y si la farmacopea asumió una forma preponderantemente botánica fue sólo porque una proporción muy grande de la medicina medieval se derivaba de los vegetales. Así, la zoología descriptiva era una parienta pobre del arte del herbolario, aunque a los animales también se les tenía por compañeros inmediatos y auxiliares del hombre, porque ofrecían útiles lecciones morales y porque algunos de ellos ejercían una fascinación exótica o simbólica. La mentalidad medieval, concibiendo que el mundo fue creado para el uso y la instrucción del hombre con miras a su propia salvación, adoptó, como es natural, una actitud un tanto funcional ante la vida. La tarea del naturalista consistía sencillamente en describir las cosas vivas, con sus aplicaciones (o maravillas, o propiedades edificantes) concretas, de tal modo

que otros hombres pudieran utilizarlas (o maravillarse o instruirse). A pesar de las dudas filosóficas que de vez en cuando pudiera tener un Alberto Magno, no había ningún motivo poderoso para elevarle por encima de una mentalidad lexicográfica. Y al naturalista la recogida de datos sobre criaturas capaces de formar el material de la ciencia le interesaba menos que las reacciones humanas ante esto o aquello, menos que las enfermedades que podían curarse con tal o cual planta, menos que la moraleja que podía sacarse de los hábitos de la hormiga león.

Así, pues, los orígenes de la historia natural fueron esencialmente antropocéntricos, en el romano Plinio, en los primitivos compiladores cristianos como Isidoro de Sevilla, en la enciclopedia del siglo XIII de Bartolomé el Inglés, en los herbolarios de la baja Edad Media. El interés humano por la naturaleza se limitó a la producción de un *catalogue raisonné.*

Las primeras etapas del Renacimiento no trajeron consigo ninguna reorientación importante. De vez en cuando el arte figurativo de un albañil o de un tallista «gótico» había enriquecido una catedral con la imagen reconocible de alguna especie viva. Más o menos a principios del siglo XV el artista gráfico empezó a darse cuenta de las posibilidades estéticas que ofrecía la imitación exacta de la naturaleza en la ilustración de manuscritos: aquí estaban las raíces tanto del arte naturalista de un Durero como de la ilustración biológica. En 1550 la técnica de la ilustración natural ya aparecía dominada con la mayor distinción en los herbarios de Brunfels (1530) y Fuchs (1542). Esta técnica acabó siendo tan necesaria para la botánica y la zoología como la anatomía humana, pero no produjo ningún aumento inmediato del nivel de conocimientos botánicos. Brunfels, de hecho, trató de encontrar un sistema más natural que el de la lista alfabética, aunque ésta no fue en modo alguno abandonada aún. Los botánicos del siglo XVI, con las excepciones de Cesalpino y Gesner, todavía eran herbolarios, y el herbario seguía siendo un accesorio de la famacopea que permitía al boticario identificar plantas medicinales tales como la celidonia y el hinojo, la salvia y la fumaria, cuyos nombres aparecen perpetuados en los tarros de mayólica de la época.

El humanismo surtió su efecto en la biología, al igual que en todas las ramas de la ciencia, sin poner en entredicho la gran importancia que se daba a la colección y la clasificación. La autoridad de Dioscórides y Teofrasto se vio reforzada en vez de debilitada; sus

textos se entendían mejor, pero no fomentaban la originalidad de las ideas. Los botánicos mediterráneos en especial abordaron la tarea de identificar con mayor exactitud las especies descritas por Dioscórides; algunos, como Mattiolo, Cordus y Conrad Gesner, se contentaron con presentar su propia labor como ampliación de la de Dioscórides, con un despliegue considerable de erudición filológica. Poco a poco se hizo evidente que los herbolarios habían abusado de los nombres griegos al aplicarlos a especies totalmente distintas de las que conocían los propios griegos; y que, además, los nombres abarcaban a menudo un grupo entero de plantas parecidas en lugar de un tipo específico. Los botánicos del norte adquirieron conocimientos de plantas no incluidas en la flora mediterránea natural; Charles de l'Écluse tiene fama de haber encontrado él solo doscientas especies nuevas en España y Portugal (1576) y más adelante tuvo igual éxito en Austria y Hungría. La catalogación y la descripción fueron llevadas mucho más allá del alcance de lo meramente útil. Se observaron plantas decorativas, como el narciso y el castaño de Indias —esta última una de las numerosas importaciones que la Europa occidental recibió durante este período— además de las medicinales, junto con muchas especies nuevas de las que dieron cuenta los exploradores del Lejano Oriente y de las Américas. Las plantas comunes y no comunes de los setos vivos, los pastizales y las tierras altas ya no eran descuidadas. Un jardín se juzgaba ahora por la multitud, la rareza y la belleza de las especies representadas en él, mientras que el *Hortus siccus* se convertía en el depósito de los trofeos intercambiados por los coleccionistas. Porque los hombres del Renacimiento coleccionaban plantas, plumajes y pieles del mismo modo que reunían monedas, estatuas antiguas y manuscritos.

Aunque en el siglo XVI no cambió mucho el carácter del fruto de tanta actividad botánica y herbolaria, ciertamente sí cambió el carácter del nuevo herbolario. Al dar menos importancia al valor medicinal, aumentó considerablemente su interés por las distinciones sutiles; mientras que el herbolario antiguo y el medieval raramente se interesaban por una unidad inferior al género, sus sucesores empezaron a distinguir entre distintas especies dentro de los géneros, e incluso entre variedades de la misma especie. Asimismo, los nuevos naturalistas solían ser eruditos y caballeros y, por consiguiente, tenían mayores oportunidades de herborizar en zonas amplias, llegando incluso a despachar emisarios con tal propósito; podían adquirir un cono-

cimiento literario más extenso y emplear los mejores dibujantes. Los hombres de esta clase sentían muy vivamente el atractivo de la naturaleza. Tal como escribió Fuchs:

> No hay ninguna razón para extenderme en alabanzas del placer y el deleite de adquirir el conocimiento de las plantas, toda vez que no hay nadie que no sepa que en esta vida no hay nada más agradable y delicioso que vagar por montañas, bosques y campos enguirnaldados y adornados con las más exquisitas florecillas y plantas de diversas clases ... Pero ese placer y ese deleite aumentan no poco si se les añade la familiaridad con las virtudes y poderes de estas plantas.[2]

La observación de Fuchs termina con un toque de esa pedantería que muy a menudo separa al científico del artista; después de todo, el científico tiende a disecar y destruir las cosas bellas, pero no hay motivo para dudar de la posible existencia de un fundamento estético en la curiosidad intelectual que, pasando por el microscopio y el herbario, lleva a la ilegibilidad de una *Flora.* Esto enlaza también de modo natural con el ansia de coleccionar y preservar, con la importancia que se da a las cosas raras y caras, todo ello tan típico de la biología desde el siglo XVI hasta el XIX. El carácter del botánico era complejo. Podía afirmar que sus actividades eran útiles al hombre y que contribuían al culto divino. En la naturaleza veía pruebas abundantes de un Designio, y así creó la tradición que a través de *Wisdom of God*, de Ray, condujo a la *Natural theology, or evidence of the existence and attributes of the Deity, collected from the appearances of nature*, de Paley. Eran, pues, varios los argumentos que hacían que la biología llamase la atención de una mente seria y devota, entre los cuales la utilidad médica no era el menos importante. Pocos naturalistas de este período habrían apoyado con entusiasmo los puntos de vista del bohemio Adam Zaluzian (1592):

> Se acostumbra a relacionar la Medicina con la Botánica, pero el tratamiento científico exige que las consideremos por separado. Porque el hecho es que en cada arte la teoría debe estar desconectada y separada de la práctica, y las dos deben tratarse por separado e

2. L. Fuchs, *De historia stirpium*, Basilea, 1542, Prefacio. Citado por A. Arber, *Herbals*, Cambridge U. P., Cambridge, 1953, p. 67.

> individualmente en su debido orden antes de unirlas. Y por esa razón, con el fin de que la Botánica, que es (por así decirlo) una rama especial de la Filosofía Natural, pueda formar una unidad en sí misma antes de que podamos relacionarla con otras ciencias, hay que dividirla y liberarla de la Medicina.[3]

La tarea del biólogo descriptivo también era mucho más compleja que la del catalogador de artefactos humanos; de hecho, fue esta complejidad la que impuso la creación de la sistemática. Los problemas de nomenclatura, identificación y clasificación se agudizaron súbitamente entre 1550 y 1650 y constituyeron uno de los temas teóricos principales de la biología durante casi trescientos años. Los naturalistas procuraban seguir un orden «natural» en el agrupamiento, lo cual significa que durante mucho tiempo se dejaron engañar por las características superficiales. En el campo de la zoología Aristóteles hacía una distinción entre los seres vivíparos y los ovíparos, entre los cefalópodos y otros moluscos; Dioscórides distribuía las plantas entre cuatro grandes grupos: árboles, arbustos, matorrales y hirebas. También eran muy antiguas ciertas distinciones menores, tales como, por ejemplo, entre huevos con cáscara y huevos sin cáscara, entre caducos y no caducos, entre florecientes y no florecientes. En su mayor parte, estas distinciones se preservaron como base para la ordenación hasta las postrimerías del siglo XVII. La nomenclatura estaba igualmente necesitada de una reforma con vistas a la normalización y el nombre debía tener una relación lógica con el sistema. La descripción constituía la base misma de una comunión de entendimiento en biología, pues de ella dependía la esperanza de crear una sola *Flora* exhaustiva gracias a la cual todos los hombres estarían de acuerdo sobre la identidad de cualquier especimen dado. En este sentido la tradición clásica era muy frágil, debido entre otras cosas a los defectos de su lenguaje al referirse a las partes de animales y flores.

Los problemas de la taxonomía no encontraron respuestas lógicas antes del siglo XVIII; incluso hoy el concepto «especie» no se puede definir con exactitud y son muchos los sistemas de clasificación que han sucedido al de Linneo. Sin embargo, los grandes compiladores del siglo XVI, en sus intentos de hacer un estudio enciclopédico de todas las cosas vivas, llegaron a dominar sobradamente el legado

3. A. Zaluzian, *Methodi herbariae libri tres*, citado por Arber, *op. cit.*, p. 144.

de los griegos y demostraron los frutos de la observación exacta. La visión que tenían de su empresa distaba mucho, por supuesto, de ser estrictamente biológica. Así, Conrad Gesner, en su enorme *Historiae animalium* (publicada en 1551-1621), además de nombrar y describir al animal, estudiaba sus funciones naturales, la calidad de su alma, su utilidad para el hombre en general y como alimento o medicina en particular, y citaba las alusiones literarias al mismo. El naturalista italiano Ulisse Aldrovandi buscaba una omnisciencia aún más honda cuando (por ejemplo), al escribir sobre el león, anotó detenidamente su importancia en los sueños, su aparición en el simbolismo y la mitología y su empleo en la caza y las torturas. Pero Aldrovandi fue también uno de los primeros zoólogos que, allí donde era posible, daba una representación esquelética de sus temas. Junto con el espíritu de pura compilación apareció una tendencia cada vez mayor a especializarse, ejemplificada en el libro de Rondelet sobre los peces (1554), en el tratado de Aldrovandi sobre las distintas razas de perros, en el *Theatre of insects* (1634) del inglés Thomas Mouffet. Todas estas obras, y algunas partes de las vastas enciclopedias, se escribieron con atención conspicua al tipo de detalle que sólo podía obtenerse mediante la observación personal sistemática. La mayoría de las fábulas antiguas que envilecen la historia natural —abejas que nacen de la carne de un becerro muerto, gansos que nacen de los percebes, la incapacidad del elefante de doblar las patas y el llanto de los cocodrilos— fueron cuando menos puestas en duda, aunque siguieron apareciendo durante mucho tiempo en los libros populares.

La clasificación de los animales de acuerdo con el esquema de Aristóteles no presentaba grandes dificultades. Los nombres en latín bastaban para identificarlos y las distinciones superficiales eran marcadas. En el grupo de los cuadrúpedos ovíparos, por ejemplo, Gesner hacía sólo unas cuantas divisiones —ranas, lagartos, tortugas— y conocía únicamente tres o cuatro clases diferentes en cada una. Las plantas eran más recalcitrantes. Las listas alfabéticas tenían su utilidad y también la tenían otras listas cuyos grupos los constituían plantas que tuvieran un hábitat o una función parecidos. Cuando se intentó facilitar la identificación mediante ordenaciones basadas en la forma y la estructura, surgieron dificultades más graves. En general, parecía que lo más aconsejable era que la clasificación fuese tan natural como fuera posible, tomando en consideración el máximo número de características, pero resultaba difícil decidir cuáles eran las más impor-

tantes de ellas. Recurrir a los rasgos superficiales como, por ejemplo, que la planta tuviera espinos, o en hábitos como el de trepar, tendía a ser muy engañoso. En consecuencia, los primeros sistematistas tendieron a utilizar cada vez más, a modo de determinante, una sola característica de la planta: De l'Obel eligió la hoja y Cesalpino la fruta. Una ventaja de este método era que conducía al estudio más intensivo de determinadas partes de la planta, especialmente la flor, y al perfeccionamiento de la terminología descriptiva. Estos sistemas, cuyo apogeo lógico y logradísimo fue el de Linneo, eran índices artificiales y útiles de la prodigalidad de la naturaleza; pero lo cierto es que fomentaron el estudio consciente de los problemas de la taxonomía. Antes de 1550 apenas había principios firmes para distinguir las especies, mientras que la clasificación de las mismas se dejaba a la discreción de cada autor. En 1650 existía ya un acuerdo muy amplio sobre identidades específicas y poco a poco iba haciéndose obvio que había una diferencia entre la búsqueda de *un método* que facilitase la identificación, y el intento de descubrir las afinidades naturales entre especies y agrupamientos más amplios.

La atención a la sistemática se debió en parte a la pura multiplicidad de especies. En 1600 ya se habían descrito unas seis mil plantas distintas y el número se triplicó durante el siguiente siglo. Dado que el buen botánico tenía a orgullo ser capaz de identificar todas las plantas que le presentasen o, en caso de ser una especie nueva, indicar su relación con las especies conocidas, había sólidos motivos para correlacionar la identificación y la ordenación con una o más características morfológicas. Caspar Bauhin esbozó en 1623 los agrupamientos naturales de las especies botánicas con mayor claridad que cualquiera de sus predecesores y utilizó más ampliamente la nomenclatura de dos términos, en la cual un elemento del nombre era compartido por el *género* o grupo de especies estrechamente relacionados. Un poco más tarde Jung, en Hamburgo, mejoró en gran medida la descripción técnica de la disposición y la forma de las hojas y de las diversas partes de la flor. Un contemporáneo más joven, el inglés John Ray (1627-1705), puso la primera piedra de la moderna biología descriptiva y sistemática, debiendo algo, al menos en botánica, a los métodos de Jung. Ray había hecho algunas disecciones, pero no era experimentador ni microscopista. Aunque sus inquietudes abarcaban la ecología, la biografía y la fisiología de sus temas —era, pues, mucho más que un simple catalogador—, personalmente no contri-

buyó mucho al progreso de las nuevas ramas de la biología que estaban creciendo en su época. En cambio, su perspectiva filosófica y científica en general era más amplia que la de la mayoría de los naturalistas que le siguieron: al igual que otros muchos miembros de la Royal Society, le fascinaba el progreso tecnológico, aceptaba el panorama general de un universo mecanicista bajo la vigilancia divina y colaboró en la expulsión del mito y el misterio de la biología.

Ray fue tal vez el primer biólogo que escribió tratados independientes sobre los distintos principios de la taxonomía.[4] Ejemplos de los mismos fueron sus grandes series de volúmenes descriptivos, la *Historia generalis plantarum* (1686-1704) y la *Historia insectorum* (1710), con la *Ornithologia* (1676) y la *Historia piscium* (1686) en las que colaboró con su patrón, Francis Willughby. Tomados en su conjunto —pues todos estos libros fueron de hecho terminados y publicados por Ray—, representaron con mucho el estudio más completo y mejor organizado de la naturaleza viva que jamás se hubiera intentado. Ray había ejercitado intensivamente su facultad para la observación por toda Inglaterra y extensivamente en gran parte de la Europa occidental; conocía a fondo los escritos de los naturalistas antiguos y modernos; sobre todo, acogía de buen grado las ideas nuevas. De Grew aceptó como probable la reproducción sexual de las plantas; de Redi y Malpighi, la refutación experimental de la generación espontánea; y él mismo enseñaba que los fósiles eran los restos auténticos de especies extinguidas en lugar de simples «bromas» de la naturaleza o pruebas, implantadas por Dios, de la fe del hombre en la veracidad de la historia del Génesis. Si la enumeración de especies era su tarea principal —que, pese a todo, le dejó espacio para su *Collection of English proverbs, topographical observations, and wisdom of God*—, Ray estaba muy lejos de suponer que la biología terminaba en la clasificación.

En la sistemática botánica Ray era partidario de un «método» más natural que los de su contemporáneo Tournefort y de su sucesor Linneo. Reconocía que la consabida distinción triple entre árboles, arbustos y hierbas era más popular que científica, aunque continuó utilizándola al mismo tiempo que reconocía la distinción, mucho más fundamental, entre plantas monocotiledóneas y plantas dicotiledóneas.

4. *Methodus plantarum nova* (1682): *Synopsis methodica animalium quadrupedum et serpentini generis* (1693): *Methodus insectorum* (1704).

Para hacer una distinción más sutil no recurría a ninguna característica única, sino que se basaba en las formas de la raíz, la hoja, la flor y el fruto. Para él era muy evidente la necesidad de un método formal de clasificación —sobre todo para los que se iniciaban en la botánica—, pero no daba por sentado que todas las formas vivientes se ajustarían perfectamente a él. Los taxonomistas chocarían siempre con la dificultad de «especies de dudosa clasificación que enlazan un tipo con otro y tienen algo en común con ambos».[5] En la clasificación zoológica Ray fue tal vez aún más afortunado porque basó sus grupos en rasgos anatómicos decisivos. Fue el primer taxonomista que aprovechó plenamente los resultados de la anatomía comparada, especialmente entre los mamíferos[6] y en lo que se refiere a rasgos tan característicos como los pies y los dientes, distinguiendo de esta manera grupos tales como los ungulados, los roedores, los rumiantes, etcétera (figura 13.1).

Mientras tanto, el microscopio ampliaba inmensamente el alcance de observación del naturalista (capítulo 9). En el empleo de este instrumento seguía dándose la mayor importancia a la descripción; en esta etapa los intentos de construir teorías complejas sobre los nuevos datos eran infrecuentes y engañosos. Había oportunidades para la ramificación de la actividad y no fueron desaprovechadas. El estudio de la anatomía de las plantas, impuesto al principio por la necesidad de sistemas de clasificación, podía pasar ahora a la estructura de los tejidos y mecanismos de reproducción; también la anatomía zoológica, estimulada por la fertilidad del método comparativo tal como demostrara Harvey y mucho antes que él, se hizo extensiva a seres tan extraños como el «orangután» (disecado por el doctor Edward Tyson),[7] y, con la ayuda del microscopio, alcanzar niveles de detalle inaccesibles a simple vista.

En su mayor parte esta nueva labor prolongó las tendencias existentes. Marcello Malpighi (1628-1694), por ejemplo, completó el descubrimiento de Harvey de la circulación de la sangre al seguir el paso de ésta del sistema arterial al sistema venoso por los vasos

5. Véase el Prefacio de *Methodus plantarum* y C. E. Raven, *John Ray, naturalist*, Cambridge U. P., Cambridge, 1950, cap. 8.

6. La Clase fue reconocida por Ray, aunque no denominada así.

7. Cf. M. F. A. Montagu, *Edward Tyson, M. D., F. R. S. 1650-1708* (Memoria XX, Amer. Phil. Soc., Filadelfia, 1943). Se trataba en realidad de un chimpancé. Tyson también publicó monografías sobre el *porpess*, la serpiente de cascabel, el *opossum*, etc.

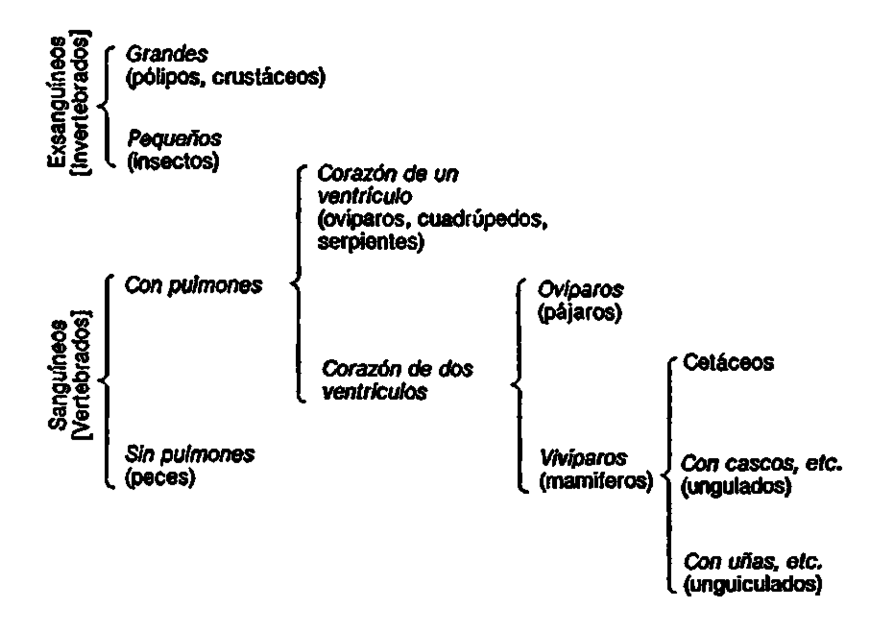


FIGURA 13.1

Clasificación de los animales según Ray

capilares, observando al mismo tiempo sus corpúsculos rojos. También consiguió ir más lejos que Harvey y Fabrizi D'Acquapendente en el examen miscroscópico del feto del polluelo durante las primeras horas de incubación, de lo cual sacó la conclusión de que el crecimiento era únicamente un proceso de agrandamiento o despliegue: el feto era «pre-formado» en el huevo aún no fertilizado.[8] Como precursor de la histología, Malpighi penetró en un terreno menos conocido con su examen microscópico del hígado, el riñón, la corteza cerebral y la lengua, cuyos «botones gustativos» descubrió él. En el estudio de los insectos —donde Aristóteles había demostrado una percepción

8. Joseph Needham, *History of embryology*, Cambridge U. P., Cambridge, 1934, pp. 144 ss. F. J. Cole, *History of comparative anatomy*, Macmillan, Londres, 1949. H. B. Adelmann, *Marcello Malpighi and the evolution of embriologoy*, Cornell University Press, Ithaca, 1966.

maravillosa—, la curiosidad científica seria que Malpighi compartía con Jan Swammerdam (1637-1680) ya la había anticipado Hooke en *Micrographia* e incluso la habían anticipado virtuosos anteriores con sus «cristales-pulgas». Sin embargo, estos dos naturalistas fueron los primeros en explorar plenamente la anatomía interna de seres minúsculos, demostrando que los órganos de los mismos están tan diferenciados como los de los animales grandes. Del tratado de Malpighi sobre el gusano de seda se ha dicho que fue la primera monografía sobre un invertebrado; en él indicaba la función de las *tracheae* que él fue el primero en observar y que consistía en distribuir aire por el cuerpo del insecto, y de los otros tubos por medio de los cuales se excretan los productos del metabolismo. Trabajó mucho en la anatomía de las fases larvales de los insectos y observó la evolución de éstos hasta la madurez, pero en este campo le superó Swammerdam, que también negaba que se produjese una transformación verdadera, siquiera en la aparición de la mariposa de la oruga, o de la rana del renacuajo, procesos que él estudió muy detenidamente. En lo que respecta a pura habilidad técnica —ejemplificada por la calidad de sus dibujos así como por la finura de su disección bajo la lente y sus métodos incomparables de inyección—, Swammerdam prefiguró los grandes recursos manipuladores de mediados del siglo XIX. Leeuwenhoek destaca principalmente por su trabajo en pos de aumentos muy superiores y por el descubrimiento de un mundo nuevo habitado por infusiones y bacterias (p. 379), pero la curiosidad ubicua que le llevó a examinar los cabellos, los nervios, la bilis, partes de las plantas, los cristales —de hecho, casi todo lo que pudiera colocarse ante sus lentes— también le indujo a hacer algunas observaciones comparables con las de Malpighi y Swammerdam, entre las cuales revestían especial originalidad las del ojo compuesto de los insectos y las de las hormigas. La observación de los áfidos le permitió descubrir la partenogénesis en los animales, es decir, la reproducción exclusivamente a cargo de la hembra.

En el reino vegetal el microscopio no pudo revelar un nuevo orden de magnitud dentro de la vida, como hizo en el reino animal; en cambio se obtuvo una idea mucho más clara de la estructura de los tejidos vegetales —incluyendo la descripción de sus minúsculos componentes, las células— de la existente en zoología. Las supuestas analogías anatómicas y fisiológicas entre animales y plantas fueron en verdad incentivos poderosos para la investigación en aquella época.

A veces la analogía era totalmente engañosa, como en el caso de la teoría (que fue popular hasta que la refutaron repetidos experimentos) según la cual la savia de las plantas circula como la sangre de los animales, pero en otros aspectos llevó a una comprensión más correcta, por ejemplo, cuando la «respiración» de las plantas fue comparada con la de los animales por Malpighi y más adelante por Stephen Hales (1679-1761). A pesar de la excelencia de sus descripciones de las distintas estructuras halladas en la madera, la médula, la hoja y la flor bajo el microscopio, así como de la germinación de las semillas, Malpighi pensaba de modo demasiado exclusivo en términos de la forma animal. Así, se equivocó al identificar la función de los vasos espirales que observó en el tejido vegetal con la función de las tráqueas de los insectos, y sobre esta identificación edificó una teoría general de la creciente especialización de los órganos respiratorios, que alcanzaban su apogeo en los mamíferos. También trató de encontrar en las plantas los órganos reproductores conocidos a través de la anatomía de los vertebrados. El inglés Nehemiah Grew (1641-1712), cuya labor independiente es muy paralela a la de Malpighi, y de la misma calidad, era un observador más comedido, aunque creía (como escribió curiosamente), «que una *Planta* es, por así decirlo, un *Animal* sin encuadernar, del mismo modo que un *Animal* es una *Planta* o, mejor dicho, varias *Plantas*, encuadernadas en un volumen»: comentario que, por extraña que resulte la metáfora, expresa una profunda intuición.

Grew sabía muy bien no sólo que los logros de los naturalistas corrientes aún distaban mucho de alcanzar sus objetivos, sino también que estos objetivos en modo alguno equivalían a un verdadero «*Conocimiento de la Naturaleza*». Su *Philosophical history of plants* (1672)[9] trazaba las líneas generales de un programa nuevo y más ambicioso. Muchos de los problemas que él planteó continúan por resolver:

> Primero, ¿qué medio emplea una *planta* o cualquier *parte* de ella para *crecer*, una *semilla* para echar *raíz* y *tronco*? ... Cómo el alimento por medio del cual una *planta* se sustenta es debidamente preparado en sus diversas *partes* ... Cómo no sólo sus *tamaños*, sino también sus *formas* son tan sumamente varias ... Luego preguntar,

9. Reeditado en *The anatomy of plants*, Londres, 1682.

> ¿cuál sería la razón de sus diversos *movimientos*; de que la *raíz descienda*; de que su descenso sea a veces *perpendicular*, a veces más *nivelado*: que el tronco *ascienda*, y que su ascensión, en lo que se refiere al espacio de *tiempo* en que se realiza, sea de distintas *medidas*? ... Además, ¿cuáles pueden ser las causas de las *estaciones* de su *crecimiento*; lo mismo de los *periodos* de sus *vidas*; algunos siendo *anuales*, otros *bianuales*, otros *perennes*? ... y finalmente, ¿de qué manera se prepara la *semilla*, formada y capacitada para la *propagación*?

El mismo Grew intentó elucidar algunas de estas preguntas y la más brillante de sus deducciones fue que las plantas se reproducen sexualmente, siendo las flores hermafroditas como los caracoles, con los estambres haciendo las veces de órganos sexuales masculinos.[10] Tampoco pasó por alto la posibilidad de examinar la sustancia vegetal mediante la combustión, la calcinación, la destilación y otros métodos experimentales de la química, aunque éstos eran aún demasiado primitivos para ser realmente útiles. De esta manera demostró que la materia de la parte medulosa o amilácea de la planta era muy distinta de la materia de la parte leñosa o fibrosa. Al igual que Ray y otros naturalistas, Grew no vio ninguna razón para rechazar el mecanismos como hipótesis de guía que él desarrolló (por ejemplo) al explicar la nutrición de las plantas; tal como él dice, utilizando un símil conocido:

> [No necesitamos pensar] que haya alguna contradicción, cuando la *filosofía* enseña que eso lo hace la *naturaleza*; lo cual la *religión* y las Sagradas *Escrituras* nos enseñan que lo hace Dios: nada más que decir. Que el equilibrio de un *reloj* es movido por la siguiente *rueda* es negar que esa *rueda*, y el resto, sean movidos por el *muelle*; y que tanto el *muelle* como todas las otras *partes* se mueven juntas por obra de su *Hacedor*. Así que *Dios* puede ser verdaderamente la *causa* de *este efecto*, aunque otras mil *causas* deban suponerse que intervienen: pues toda la naturaleza es como una gran *máquina*, hecha por y sostenida en Su mano.[11]

10. *Op. cit.*, pp. 171-173. El hermafroditismo, huelga decirlo, no es universal entre las plantas, como creía Grew.
11. *Ibid.*, p. 80.

Un esbozo general del horizonte de la biología alrededor del año 1680 mostraría gran actividad, una continua expansión de la esfera de interés y el frutífero empleo de técnicas nuevas. Es verdad que el hombre seguía siendo el principal foco de atención, ya fuera en el empeño de la Royal Society en introducir el espíritu científico en la agricultura, o en las reliquias de la creencia (que albergaba todavía un anatomista de plantas como Grew) de que todos los vegetales tienen «virtudes», o en las frecuentes miradas hacia atrás, hacia el cuerpo humano, que lanza el zoólogo. Con todo, a medida que se fueron alejando rápidamente, las zonas periféricas asumieron, por así decirlo, una autonomía territorial. Los vestigios de antropocentrismo en la febril concentración de Swammerdam eran escasos. Es significativo que los naturalistas dejaran de defender sus inquietudes presentándolas como útiles, y que, en vez de ello, dijesen que eran aportaciones al conocimiento del universo, de la parte orgánica de la máquina de creación divina. Y, aunque continuaron ocupándose principalmente de la descripción y la catalogación de flora y fauna macroscópica, se hacía evidente que la historia natural estaba formando asociaciones que pondrían a su servicio las habilidades del anatomista humano y del fisiólogo, del químico y del físico. Poco a poco, a lo largo del siglo XVII, la biología había vuelto a la actitud filosófica de un Aristóteles; ahora parecía probable que la toma en préstamo de conocimientos y técnicas modernos permitiría superar a los antiguos en medida tan grande en estas ciencias como en la física y la mecánica.

En pocas palabras, había promesa, una promesa de crecimiento en profundidad y extensión que apenas se cumplió durante el siglo y medio subsiguiente. El hecho de que no se hiciese realidad cabe atribuirlo en parte a la que las esperanzas del principio eran falsas, puesto que ni la técnica microscópica ni el experimento químico fueron capaces de cambiar la pauta de actividad de manera tan permanente como hacía pensar el trabajo realizado durante los dos decenios 1660-1680. Estas herramientas toscas no tardaron en embotarse. La íntima relación entre la biología y la medicina, que había fomentado el estudio de la primera durante el siglo XVII, tendió a obstaculizar su evolución posterior, porque, como los estudios de medicina estuvieron impregnados de la influencia de las ideas de Galeno hasta el siglo XIX, resultó imposible que los estudios de animales y plantas se librasen de las limitaciones de tales ideas. Incapaces, por

el momento, de construir libremente hacia arriba sobre los cimientos a medio terminar que pusieran sus predecesores, los naturalistas del siglo XVIII bien podían sentirse desalentados ante el esplendor de su herencia. El desaliento fue tanto más severo cuanto que esta influencia incluía un elemento de hipótesis muy débil que debía hacer las veces de andamiaje para sus propias investigaciones. No es de extrañar que después de eso sintiesen con fuerza una atracción positiva que era a la vez vieja y nueva. Igual que los enciclopedistas del siglo XVI, estaban sujetos a un vasto *incursus* de especies nuevas, fruto de un renovado interés por la exploración que empujó a Linneo hacia la tundra subártica y a Joseph Banks al Pacífico y Australasia. Además, esta invasión sincronizó, no con una sensación de confusión ante la prodigalidad de la naturaleza, sino con una confianza cada vez más dogmática en un sistema, el sistema de Linneo. Muy de pronto, hacia mediados de siglo, la clasificación se convirtió en uno de los ejercicios biológicos más fáciles en vez de ser uno de los más difíciles. Ni por primera ni por última vez en la ciencia, hubo prisas por recoger la cosecha al mismo tiempo que se descuidaban los campos no cultivados.

El gran debate entre ovistas y animalculistas fue más generalizado y aún menos fructífero. Harvey había creído en la epigénesis, es decir, en que el crecimiento del embrión se producía tanto por la diferenciación gradual de sus partes como por el incremento del tamaño de éstas: «no hay ninguna parte del feto realmente en [el huevo], y, pese a ello, todas sus partes están en [el huevo] en potencia». El efecto de la microscopia, al poco de morir Harvey, fue dar una ventaja inmediata a la teoría alternativa, esto es, la preformación, según la cual el embrión nacía de la simple hinchazón de una partícula que estaba completamente diferenciada desde el principio; tal como dijo Henry Power: «Tan admirable es la formación de cada uno de los órganos de esta máquina nuestra, que cada parte que hay dentro de nosotros está enteramente hecha, cuando el órgano parece demasiado pequeño siquiera para tener partes». La preformación la cultivaron especialmente Malpighi y Swammerdam. Dado que el embrión, entre los seres ovíparos, se desarrolla en el huevo materno —y los microscopistas creían que los primeros signos de su forma futura podían detectarse tan pronto como aparecía el huevo— suponían, como es natural, que el embrión, o el embrión en potencia, se derivaba exclusivamente de la hembra. Esta opinión era oportunamente

contraria al concepto aristotélico y pasado de moda según el cual el varón, que suministraba la «forma» activa, era el agente principal de la generación, mientras que la hembra se encargaba meramente de la «sustancia» pasiva de los vástagos. Parece ser que Aristóteles se vio aún más postergado a causa del descubrimiento, atribuido a De Graaf (1672), del óvulo de los mamíferos. Este supuesto descubrimiento fue prematuro: lo que vio De Graaf fueron los folículos que desde entonces llevan su nombre y el verdadero óvulo lo describió por vez primera Von Baer al cabo de un siglo y medio. Sin embargo, el «descubrimiento» produjo un cambio esencialmente correcto en el pensamiento: a partir de entonces se creyó que tanto la reproducción vivípara como la ovípara empezaban con la fertilización de un óvulo formado en la hembra. Según los ovistas, el óvulo contenía el embrión, no en potencia, sino realmente, y en la versión de su teoría que se conoce con el nombre de *emboitement* suponían que éste llevaba dentro de sus propios órganos los óvulos de la generación siguiente y así sucesivamente *ad infinitum*, como una serie de cajitas chinas: en los ovarios de Eva estaban encerradas las formas futuras de toda la raza humana.

El descubrimiento de los espermatozoos trajo consigo una teoría contrastante pero al mismo tiempo paralela. Leeuwenhoek, en una de las raras ocasiones en que expresó una hipótesis, apuntó que estos «animales pequeños» eran los embriones vivos, a los que se permitía crecer trasplantándolos al óvulo: «Si vuestro Harvey y nuestro De Graaf hubieran visto la centésima parte, habrían manifestado, como hice yo, que lo que forma el feto es exclusivamente el semen del varón, y que todo lo que puede aportar la mujer sólo sirve para recibir el semen y alimentarlo».[12] En apoyo de su doctrina hizo alusión a casos muy conocidos en los que los vástagos llevaban fuertemente marcadas las características del padre. Hartsoeker (1694) y Plantades (1699) —puede que el segundo hiciera trampa deliberadamente— publicaron ilustraciones de un «homúnculo» encerrado en la cabeza de un espermatozoo. La *emboitement* fue adoptada también por los animalculistas del siglo XVIII. Durante más de cien años siguieron interpretándose de distintas maneras observaciones que acostumbraban a

12. Carta a Nehemiah Grew, 18 de marzo de 1678. Leeuwenhoek, *Collected letters*, vol. II, Swets and Zeitlinger, Amsterdam, 1941, p. 335. Sobre todo esto, véase Jacques Roger, *Les sciences de la vie dans la pensée française au 18e siècle*, Armand Colin, París, 1963.

ser muy imperfectas y que se anotaban descuidadamente. Para algunos los espermatozoos eran productos de la corrupción, como los nematodos del vinagre, pues hasta 1824 no se demostró que eran esenciales para la fertilización. La demostración la hicieron Dumas y Prévost. Más o menos en la misma época los experimentos de Geoffroy Saint-Hilaire sobre la producción de monstruos demostraron que la morfología del embrión no está preformada ni predestinada. Para entonces la preformación como teoría embriológica ya estaba moribunda, pues había empezado a decaer en el mismo momento en que Caspar Wolff resucitara vigorosamente la epigénesis (1768), señalando que el examen imparcial con el microscopio demostraba que la formación de estructuras tenía lugar a partir de tejidos previamente no diferenciados.

Mucho antes de esta época la iniciativa de la experimentación biológica había pasado decisivamente de Inglaterra y los sucesores de William Harvey al continente. Sería difícil encontrar equivalentes ingleses adecuados de la obra de Spallanzani sobre la digestión, de la de Lavoisier y sus colaboradores sobre la respiración, y de la de Ingenhousz sobre la fotosíntesis, ya que por aquel entonces el talento inglés más bien se decantaba por las cosmogonías especulativas. Pero durante los últimos años de Newton un inglés, Stephen Hales (1677-1761), se erigió en fundador de una nueva rama de la ciencia, la fisiología vegetal, y ejerció también una potente influencia en el desarrollo de la química. Sus vínculos intelectuales con Newton eran estrechos, como veremos en el próximo capítulo, aunque sus contactos personales fueron leves, ya que Hales era estudiante en Cambridge en la época de William Whiston, Roger Cotes, John Francis Vigani y especialmente William Stukeley (1687-1765), que más adelante sería amigo de Newton y destacaría como estudioso de la antigüedad. Fue Stukeley quien inició a Hales en la botánica y la disección animal. Juntos protagonizaron algunas bromas alocadas, según Stukeley: «Cogimos al viejo Hoyes que se colgó y fue enterrado en el camino real y lo disecamos, y después hicimos un esqueleto con sus huesos, y lo colocamos en una bella vitrina de cristal con una inscripción en latín».[13] También en Cambridge Hales inició sus experimentos sobre la presión y el flujo de la sangre en los animales, experimentos des-

13. Michael Hoskin, Prefacio a Stephen Hales, *Vegetable staticks* [1727], reimpresión 1961, p. XI.

critos posteriormente en *Haemostaticks* (1731) que él (filósofo sumamente humanitario) siempre consideró desagradables y que inspiraron sus investigaciones afines del flujo de la savia en las plantas. Su técnica se remonta en línea recta sólo a Torricelli y Pascal; en vez de comparar el peso de una columna de mercurio con la presión de la atmósfera, Hales vinculaba su manómetro (como ahora podemos denominarlo) a los vasos sanguíneos de los animales o los tallos de las plantas. Iniciando estos experimentos en 1719, Hales midió primeramente la gran altura hasta donde ascendía la savia en primavera, utilizando para ello un tubo pegado a un rama de parra y anotando su variación según el tiempo cronológico y el tiempo meteorológico. Más adelante investigó el volumen de fluido que pasaba a través de una planta que creciera activamente y que a través de sus hojas transpiraba a la atmósfera, relacionando esto con el total de la superficie de las hojas, de la que se cercioró mediante un minucioso proceso de contar y sacar muestras. También midió el crecimiento de las hojas. Pudo comprobar que la savia era empujada vigorosamente tallo arriba por una presión activa en la raíz, y luego impelida hacia adelante por el «poder vastamente atractivo» de los finos vasos capilares hasta que finalmente transpiraba en la superficie de la hoja. Partiendo de un experimento de Francis Hauksbee que Newton describía en la cuestión 31 de *Opticks*, Hales aplicó su técnica a la medición propiamente dicha, mediante su manómetro mercurial, de la «fuerza de absorción» de una columna llena a rebosar de ceniza de madera: la columna de mercurio subió 18 centímetros, equivalente a 2,50 metros de agua. Otra línea de investigación, que inició al observar burbujas de aire dentro de los tubos llenos de savia, le hizo pensar que era «muy probable que el aire entrara libremente en las plantas, no sólo por el principal punto de nutrimiento, las raíces, sino también a través de la superficie de sus troncos y hojas, especialmente de noche, cuando cambian de un estado [transpirante] a otro fuertemente absorbente». Hales creyó que una parte de dicho aire se mezclaba con la tierra, y que otra parte quedaba fija, en estado inelástico, en el suelo: «Deseando hacer más investigaciones de esta cuestión, así como comprobar qué proporción de este aire podía obtener de las diferentes sustancias en las cuales estaba alojado e incorporado»,[14] Hales empezó a analizar numerosas sustancias, algu-

14. *Ibid.*, pp. 87-89.

nas, como las conchas de las ostras y el roble, por ejemplo, muy duras y densas, a las que sometió a destilación, recogiendo por primera vez el «aire» emitido en el proceso por medio de la artesa neumática inventada por él mismo.

A pesar de los aspectos fluidos y neumáticos de analogía entre las propiedades de las plantas que investigó y de los animales, éstos más conocidos, Hale renunció finalmente a la idea de que en la planta habría una circulación regular de la savia como la de la sangre, aunque cincuenta años antes muchos se inclinaban a creer que la analogía era completa en este sentido.

En la conclusión de *Vegetable staticks* (1727), donde exponía sus experimentos de un modo que sin duda debía tanto al ejemplo de Boyle como al de Newton, Hale analizó principalmente las lecciones útiles que los jardineros y cultivadores de fruta podían sacar de sus descubrimientos. Como en el caso de sus predecesores, en Hales se combinaban la filosofía mecanicista con la veneración por el supremo Creador; «la diferencia específica de los vegetales —afirmó— sin duda se debe a la formación muy diferente de sus minúsculos vasos, por lo cual existe una variedad casi infinita de combinaciones de los principios comunes de los vegetales». Añadió que, además,

> si nuestros ojos pudieran tener una visión de la admirable textura de las partes de las que dependen las diferencias específicas de las plantas, ¿qué asombrosa y bella escena de inimitable bordadura contemplaríamos? ¿Qué variedad de magistrales trazos de organización? ¿Qué marcas evidentes de sabiduría consumada nos entretendrían? [15]

La intrincada, diminuta perfección del mecanismo biológico, la soberbia adaptación de determinadas plantas a determinadas condiciones del suelo y de la humedad en las que insiste Hales, y la maravillosa adaptabilidad de las respuestas de los organismos a las cambiantes condiciones ambientales, nada de todo esto podía sustituir a la divina providencia, sino que era más bien la prueba más sublime y refinada de que existían una providencia y un designio.

Probablemente, pocos historiadores desearían argüir que los anatomistas y naturalistas de Harvey a Hales hicieron en sus estudios

15. *Ibid.*, p. 205.

una «revolución científica» en el sentido en que Thomas S. Kuhn[16] utiliza esta expresión. No echaron por tierra ninguna serie de paradigmas referentes a la constitución y la distribución de las cosas vivas; ni la sustituyeron por otra serie. Si algo había, en 1750, ese algo era un desacuerdo más profundo que en 1600 sobre los posibles problemas de esta clase. En cambio, no es menos cierto que el estudio de las cosas vivas sí participó en la revolución científica, cuyo núcleo típico estaba ciertamente en las ciencias matemáticas. Una cita conocida lo demuestra de modo casi incomparable; se trata de las palabras con las que Newton concluyó la segunda edición de sus *Principia*:

> Cabría añadir ahora algunos comentarios acerca de cierto espíritu muy sutil que impregna los cuerpos densos y que yace dentro de ellos y por cuya fuerza y acciones las partículas de los cuerpos se atraen mutuamente a las mínimas distancias y se unen al tocarse; y los cuerpos eléctricos operan a mayores distancias ... y la luz es emitida, reflejada ... y toda sensación es estimulada; y las extremidades de los animales son movidas a voluntad, a saber, por las vibraciones de este espíritu extendido a través de los sólidos filamentos de los nervios desde los órganos sensoriales externos hasta el cerebro, y desde el cerebro de vuelta a los músculos. Pero de estas cuestiones no se puede tratar con unas pocas palabras, ni disponemos de experimentos suficientes para determinar y demostrar exactamente las leyes de acción de este espíritu.

Hay que reconocer que no está nada claro qué era exactamente lo que quería decir Newton con estas extrañas frases. Un pasaje más largo e inédito indica el pensamiento de Newton en el sentido de que el «espíritu visual» debía ser continuo a partir de un medio transparente que transmitiera luz al ojo y al sistema nervioso, y que, como los cuerpos cargados de electricidad podían brillar, este «espíritu visual» y el «espíritu eléctrico» eran idénticos.[17] Pero lo que tiene mayor importancia en este contexto es que Newton homologue de modo tan claro la física con la fisiología animal. Hace una afirmación

16. T. S. Kuhn, *The structure of scientific revolutions*, Chicago University Press, Chicago, 1962.
17. Newton, *Correspondence*, V, Cambridge U. P., Cambridge, 1975, pp. 366-367. Cf. Henry Guerlac, *Essays and papers in the history of modern science*, Johns Hopkins University Press, Baltimore & Londres, 1977, pp. 120-130.

de la unidad fundamental de la explicación causal en los reinos orgánico e inorgánico tan audaz como las que puedan encontrarse en Descartes y, de hecho, en este pasaje es muy evidente la deuda no reconocida que Newton había contraído con Descartes. Vemos aquí el sentido profundo y metafísico en el cual la idea de la vida y de la acción viviente en modo alguno estaba ausente de los procesos intelectuales de la revolución científica. Decir que Newton, al igual que Descartes, trataba al animal como una máquina sería ir mucho más lejos de lo que permiten las pruebas que tenemos; lo que es seguro es que, al mismo tiempo que evita semejante afirmación retórica y (de hecho) vacía, Newton aceptaba sin vacilación la continuidad y la homogeneidad del organismo vivo con su medio no vivo, al menos en lo que se refiere a todas sus interacciones. (Esto deja pendiente la cuestión de la *voluntad* —que Descartes negaba a los animales—, entre otras.) Es decir, en la medida en que el organismo se compone de estructuras físico-químicas y muestra propiedades del mismo tipo, está completamente de acuerdo con el resto del universo, sin distinguirse de él salvo (volviendo a las palabras de Hales) en la «variedad casi infinita de combinaciones del principio común».

Tenemos aquí una metafísica potencialmente poderosa, compartida por Ray, aceptada por Hales, cristiana y providencial pero defendiendo con firmeza las facultades explicativas de la filosofía mecanicista. Y en la ciencia objetiva recibió fuerte apoyo de la observación y la investigación experimental de Bacon, los rasgos transformadores de las ciencias biológicas durante los siglos XVI y XVII, de las cuales se han apoderado (no inoportunamente) los apologistas por considerarla digna de compararse con los logros de los astrónomos y de los matemáticos. Así, Charles Raven se quejó con razón del carácter *whig* de los historiadores de la ciencia, que juzgan los acontecimientos del pasado exclusivamente en términos de sus anticipaciones y aportaciones a la «ortodoxia imperante en su propio tiempo».[18] En el nivel más sencillo, el del estudioso de la antigüedad, a los naturalistas del pasado debemos rendirles el tributo de registrar y comprender sus realizaciones, sobre todo la ejemplificación de su creencia racional de que los fenómenos de las cosas vivas debían investigarse enumerativa, experimental y analíticamente como las propiedades del

18. C. E. Raven, *Natural religion and Christian theology*, Cambridge U. P., Cambridge, 1953, p. 7.

mundo orgánico; en un nivel más profundo, el histórico, es aún más importante comprender que si (como reconoce Raven) los siglos XVI y XVII hicieron una escasa aportación directa, objetiva, al laboratorio y a la biología evolucionista del siglo XIX, a pesar de ello los cambios de perspectiva ante la vida y sus fenómenos que a la sazón tenían lugar sí contribuyeron de manera importante a la visión del mundo propia del siglo XVIII. Ver una dicotomía vitalista-mecanicista en los postreros años de Newton constituye un grave error histórico que haría totalmente incomprensible la armonía de esfuerzos entre hombres de inquietudes y creencias religiosas variadas.

CAPÍTULO 14

EL LEGADO DE NEWTON

En el primer año del siglo XVIII, catorce años después de la publicación de los *Principia*, dos años después de que la reorganización de la Real Academia Francesa de las Ciencias acogiera a Newton en calidad de miembro extranjero, cualquier persona que mirase hacia atrás y pasase revista a la herencia científica del siglo XVII habría comprobado que era rica y variada. El neocartesianismo era la filosofía natural que imperaba a la sazón, con Leibniz y Malebranche como figuras activas e influyentes, mientras las lecciones de Huygens conservaban su fuerza lógica. Confinada mayormente en Alemania por el momento, iba evolucionando una tradición de misticismo químico, enraizado en Van Helmont y Paracelso, cuyos representantes eran Johann Joachim Becher (1625-1682), Johann Künckel (1630-1703) y Georg Ernst Stahl (1660-1734); también en Alemania era especialmente grande el interés por la medicina, mientras que la anatomía comparada había florecido bajo la tutela de la academia de París, y en Holanda, donde Frederick Ruysch (1638-1731) era el maestro activo. La astronomía era cultivada no sólo en Greenwich por Flamsteed (ahora enemigo de Newton), sino también en París, donde la familia Cassini adquirió el observatorio casi como si se tratara de un feudo hereditario, así como por muchos astrónomos «aficionados». En las ciencias matemáticas Leibniz, sus colaboradores y los alumnos de éstos dominaban el mundo académico desde Padua hasta Groningen, y, especialmente en la persona de Pierre Varignon (1654-1722), estaban firmemente establecidos en la Academia francesa. Habría sido un juicio justo sobre los cincuenta años previos sacar la conclusión de que se había aprendido mucho, especialmente en las

ciencias descriptivas, y que las matemáticas puras y aplicadas habían avanzado velozmente. Pero sólo un número relativamente reducido de ingleses hubiera dicho que durante el citado período el carácter del trabajo y el pensamiento científico había experimentado un cambio muy radical; todo europeo que en 1701 se percatara del cambio lo atribuiría a Huygens y Leibniz.

Medio siglo después la visión retrospectiva hubiera sido totalmente distinta; muchas cosas que en 1701 parecían apasionantes ahora semejarían insignificantes, mientras que las tradiciones empírica y matemática inglesas, que los filósofos continentales ya conocían de hacía tiempo pero consideraban generalmente como idiosincráticas e incluso extrañas, aparecían como portadoras del mensaje de la verdad. Bacon, Harvey y Boyle habían adquirido nueva importancia como precursores del método newtoniano. En 1750 la filosofía y la ciencia inglesas, incluso las costumbres sociales y las instituciones políticas inglesas, ya eran alabadas y cultivadas por quienes se tenían por ilustrados. Contra todo precedente histórico, aquellos isleños casi bárbaros estaban demostrando ser inteligentes, cultos y prósperos y parecían iluminar Europa con su luz.

Una fecha oportuna y convencional para este cambio de perspectiva es 1734, año en que Voltaire publicó sus *Lettres philosophiques* (*Cartas sobre la nación inglesa*), en donde los franceses podían leer, por ejemplo:

> Muy pocas personas en Inglaterra leen a Descartes, cuyas obras, de hecho, son ahora inútiles. Por otro lado, sólo un número reducido lee las de sir Isaac Newton, toda vez que para hacer esto el estudiante debe poseer profundos conocimientos de matemáticas, de lo contrario esas obras le resultarían ininteligibles. Pero, a pesar de ello, estos grandes hombres son el tema de conversación de todo el mundo. A sir Isaac Newton se le conceden todas las ventajas, mientras que a Descartes no se le consiente ni una sola ... En una palabra, sir Isaac Newton es aquí como el Hércules de la historia fabulosa, a quien los ignorantes atribuían todas las hazañas de los héroes antiguos.[1]

Dos años antes Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) había publicado *Un discurso sobre las diferentes formas de las estre-*

1. *Lettres sur les Anglais*, 1734, carta 14.

llas, el primer tratado newtoniano escrito por un francés, mientras que Voltaire volvía con sus *Elementos de la filosofía de Newton* en 1738. Ambos hombres habían visitado Inglaterra; de hecho, Voltaire vivió allí «para el bien de su salud» de 1726 a 1729. Pero estos dos distaban mucho de ser los primeros franceses que inspeccionaron la filosofía inglesa predominante y que le rindieron homenaje. Es fácil olvidar que la guerra, casi tanto como las ideas, separó la vida intelectual francesa de la inglesa durante casi veinticinco años de 1698 a 1714. Poco después de que en Europa se restaurase un orden estable y pacífico, un grupo de franceses (Rémond de Monmort, C.-J. Geoffroy y el Chevalier de Louville) se trasladaron a Londres para observar un eclipse de sol que iba a ser visible desde allí, pero no desde París, y para aprender más cosas sobre la ciencia inglesa. Por medio de experimentos confirmaron la exactitud de las explicaciones newtonianas de sus separaciones de los colores y de las mediciones que hacía en *Opticks*, y Louville se convirtió en un newtoniano convencido. Poco después de su regreso a Francia se expresó en términos exagerados a Newton:

> ... gracias a vos, nos está ahora permitido iniciarnos en los misterios de la naturaleza, y se nos permite el conocimiento de sus secretos más recónditos. Pero con vuestros descubrimientos no sucede como con aquellos sistemas famosos que se fundan exclusivamente en conjeturas, y que pueden ser derrocados fácilmente por otras conjeturas. Vos habéis erigido el magnífico edificio de vuestra filosofía sobre cimientos inamovibles.[2]

No obstante, antes de que Maupertuis visitara Inglaterra en 1728 *Opticks* había atraído más interés que los *Principia*. *Opticks* llegó a París en 1706, cuando desde hacía veinticinco años no se hablaba allí de las teóricas ópticas de Newton, desde que Edmé Mariotte, en *Sobre la naturaleza de los colores* (1681), señalara la falsedad experimental de la afirmación de Newton en el sentido de que un color espectral puro no podía ser todavía más escindido por la refracción.[3] E.-F. Geoffroy preparó un resumen en francés del libro que fue leído en la Academia de Ciencias y rápidamente hizo un converso notable

2. Newton, *Correspondence*, VI, 1976, p. 398.
3. Henry Guerlac, *Newton on the Continent*, Cornell University Press, Ithaca, 1981, pp. 78-163.

en la persona del padre Malebranche, después de que Dortous de Mairan le confirmase los experimentos. Diez años más tarde toda sospecha razonable de que Newton estuviera equivocado en sus informes fue enterrada gracias a la minuciosa repetición (de la que dieron cuenta detallada las *Philosophical Transactions*) por J.-T. Desaguliers de estos experimentos ya clásicos. Es casi seguro que la repetición se efectuó porque en una reseña de 1713 Leibniz resucitó el escepticismo de Mariotte. Con todo, a instigación de varios grandes personajes, los experimentos se repitieron otras dos veces en París y el éxito continuo de los mismos y la vindicación de la teoría de Newton allanaron el camino para su primer gran éxito público en Francia: la publicación de una elegante traducción francesa de *Opticks* en 1722.[4] Nada menos que el canciller de Francia patrocinó dicho trabajo, cuya edición corrió a cargo de Varignon, que era colaborador tanto de Malebranche como de Leibniz.

Así, cuando Newton contaba ya unos ochenta años, se hicieron grandes esfuerzos por colocarle en la órbita de la ciencia francesa: se le instó a comunicar los resultados de sus investigaciones y en general se le trató como a un príncipe. No cabe poner en duda el destacado papel de los oratorianos, que unos veinte años antes aprendían el cálculo diferencial e integral de Leibniz y Johann Bernoulli, en el comienzo de la naturalización de Newton en Francia en oposición a los inexorables cartesianos ortodoxos; citando a Henry Guerlac: «Malebranche y sus seguidores derribaron las barreras iniciales de la fortaleza cartesiana, e hicieron más fácil el camino para newtonianos radicales como Maupertuis, Clairaut, y Voltaire».[5] La veneración de los oratorianos por las matemáticas como «la disciplina principal y fundamental de todas las ciencias humanas», veneración que les había hecho discípulos de Leibniz, después les hizo admirar y aprobar los logros de Newton en los *Principia*, el único ensayo universal y convincente de matematización de la filosofía. No tardaron en sentir ansias de transformar las formulaciones geométricas de Newton en su propio lenguaje matemático del cálculo, tarea de la que también se encargó Varignon y que fue publicada en las *Mémoires* de la academia de París entre 1700 y 1710. Otro matemático oratoriano, Charles René Reyneau (1656-1728) tenía evidentemente

4. Se basaba en la versión francesa de Amsterdam, 1720.
5. *Op. cit.* (en nota 3), p. 73.

una excelente opinión de los aspectos técnicos de los *Principia*, aunque, al igual que otros miembros de su grupo, no se decidía a compartir del todo la filosofía newtoniana de la naturaleza.[6] Los «malebranchistas» adoptaron una postura que en esencia era positivista; aceptando la idea de la fuerza centrípeta del inverso del cuadrado y la teoría matemática de su acción, estaban dispuestos a no hacer caso de ningún comentario de la ontología de la fuerza. Deseaban modificar radicalmente sus especulaciones etéreas con el fin de que no chocasen con los teoremas matemáticos de Newton, cuya concordancia exacta con los fenómenos despertaba su admiración, pero no querían aceptar la espantosa idea de la «atracción». Por este motivo se les puede clasificar como newtonianos de transición.[7]

La tendencia al newtonismo en el resto de Europa (exceptuando Alemania) fue parecida, pero menos prolongada. Es posible que el matemático italiano Guido Grandi (1671-1742) ya estuviera enseñando los aspectos matemáticos de los *Principia* en Florencia antes de terminar el siglo XVII. En Padua, en 1716, Jakob Hermann, en un libro sobre mecánica dedicado a Leibniz y a los miembros de la academia de Berlín, permitió a un amigo que se le dirigiera en un poema que decía que «Newton, morador en esa isla rica en la que, sin embargo, no hay nada más áureo que él mismo, había sido el primero en seguir esta senda». Y lo que es más significativo: un italiano, Francesco Algarotti, escribió *Newtonianismo per le dame* (1737), una de las obras de popularización más afortunadas de la Ilustración. El cartesianismo nunca había tenido unas raíces muy sólidas en Italia: con el debilitamiento del clericalismo estéril a partir de 1720 aproximadamente, Italia entró con rapidez en la fase newtoniana. Además, la transición recibió ayuda de la fuerte predilección que los filósofos de la naturaleza italianos sentían por los argumentos matemáticos y del orgullo creciente que les inspiraba Galileo, en quien empezaban a ver al gran precursor de Newton.

En Holanda, en cuyas universidades el cartesianismo adquirió por primera vez respetabilidad académica, aunque inclinándose mucho a la demostración y la justificación experimentales en lugar de al argumento racional, la influencia de Newton va íntimamente ligada a William Jacob Gravesande (1688-1742), profesor de matemáticas y

6. Newton, *Correspondence*, VI, 1976, pp. 188-189.
7. Guerlac, *op. cit.* (en nota 3), pp. 61-62.

astronomía en Leiden desde 1717. Éste había empezado a expresar la originalidad de su perspectiva fundando, junto con otros, el *Journal Littéraire de la Haye* (1713), que pronto abrió sus páginas a los newtonianos ingleses: pasó un año en Inglaterra (1715-1716), donde pudo conocerles personalmente. Tuvo un éxito extraordinario como maestro y desarrolló los métodos demostrativos de instrucción en clase que John Keill y J.-T. Desaguliers ya habían aplicado en Inglaterra a la mecánica newtoniana. Estos métodos recibieron mucha publicidad a través de un libro de Gravesande titulado *Elementos matemáticos de la filosofía natural confirmados por experimentos; o Una introducción a la filosofía de sir Isaac Newton* (1720), que inmediatamente se tradujo al inglés. Un maestro todavía más grande, Hermann Boerhaave (1668-1738), que amplió aún más la elevada reputación de la escuela de medicina de Leiden, también adoptó ciertas ideas newtonianas; no las de la física exacta de Newton, sino las ideas referentes a la estructura corpuscular de la materia que Boerhaave encontró en las cuestiones de *Opticks*, para las cuales ya estaba preparado gracias a su familiaridad con la química corpuscular de Robert Boyle. El tercer miembro del trío de profesores newtonianos holandeses era Petrus van Musschenbroek (1692-1761), amigo de Gravesande, que también visitó Inglaterra en 1715; enseñaba en Utrecht y en Leiden, perfeccionando la tradición empírica establecida por su amigo. Era un gran proyectista de aparatos experimentales y su nombre ha quedado asociado inmortalmente, en la ciencia eléctrica, al descubrimiento o invención de la «botella de Leiden».

Parece que, al principio, los holandeses fueron casi los únicos que apoyaron a los newtonianos ingleses contra Leibniz en los referente al descubrimiento del cálculo. Si el primer gran empujón a la fama de Newton en el continente se lo dio *Optice* (1706), versión de *Opticks* en latín —y no en menor medida la generosa gama especulativa de sus cuestiones— también es cierto que el creciente acaloramiento y la publicidad de la querella entre los dos grandes filósofos y sus respectivos partidarios contribuyeron a que el nombre de Newton llamara la atención de muchas personas que, de no ser por ello, apenas se habrían enterado de la existencia de los *Principia* (que después de 1687 no se reeditaron hasta 1713 y fueron luego rápidamente «pirateados» en Amsterdam). Tras la muerte de Huygens en 1695, toda Europa excepto los ingleses reconoció a Leibniz como su luz intelectual más destacada: matemático, filósofo, inventor, histo-

riador, amigo y consejero de monarcas y, a diferencia de Descartes, siempre eminentemente respetable. Que un matemático inglés opusiera sus pretensiones a semejante figura era un hecho notable; que estas pretensiones fueran defendidas, ampliadas y sostenidas por una justificación impresa que, al parecer, contaba con el respaldo unánime de la Royal Society resultaba casi increíble.[8] Sabemos que Newton tenía razón al reclamar prioridad de descubrimiento, que Leibniz también la tenía al reclamar prioridad de descubrimiento independiente y de publicación. También es obvio que, a pesar de algunos destellos de magnanimidad entre los dos rivales, los dos se comportaron muy mal. Antes de su muerte en 1716, que no influyó en el resultado de la querella, Leibniz no había logrado convencer al mundo de que no había aprendido nada de la gran cantidad de material matemático de los primeros tiempos, incluyendo las cartas dirigidas a él en 1676, que ahora Newton exponía (en general, no de forma inexacta en lo que se refiere a los textos, aunque las glosas de los mismos que hizo Newton contienen groseras tergiversaciones). Dado que Leibniz reconocía haber tenido acceso a materiales inéditos de Newton, que los rasgos técnicos del descubrimiento eran difíciles de valorar para quien no fuera un gran matemático, dada la aparente franqueza de Newton y dada aquella autoridad personal que ganaba para su causa a casi todos los que le visitaban en Londres, y dado que Leibniz no dio absolutamente ninguna explicación en público de cómo y cuándo llegó independientemente al concepto del cálculo, apenas sorprenderá a nadie que muchos que no eran partidarios fervorosos de Leibniz llegasen a creer que el descubrimiento matemático de Newton había sido de los que hacen época, tanto como el de Leibniz, aunque menos desarrollado, y que el descubrimiento de Newton había producido los *Principia.* Así, por ejemplo, Voltaire en sus *Cartas sobre la nación inglesa:*

> Durante muchos años la invención de este famoso cálculo [el *calculus*] le fue negada a sir Isaac Newton. En Alemania Leibniz era considerado como el inventor de las diferenciales o momentos, llamados fluxiones [por Newton], y Bernoulli reclamaba el cálculo integral. Sin embargo, ahora se piensa que sir Isaac fue el primero en hacer el descubrimiento, y los otros dos tienen la gloria de haber

8. A. Rupert Hall, *Philosophers at war*, Cambridge U. P., Cambridge, 1980, especialmente cap. 11.

> hecho que una vez el mundo dudase sobre si debía atribuirse a él o a ellos.[9]

Los escritos matemáticos de Newton, ahora pasados de moda, comenzaron a llegar al continente a partir de 1708. En 1740 el traductor de la obra de Newton titulada *Method of fluxions and infinite series* (escrita en 1671 y publicada por vez primera en 1738) escribió:

> ... en la manera de tratar los temas se reconocerá la mano del gran Maestro, y el genio de los descubrimientos; y persistirá el convencimiento de que Newton y nadie más es el autor de estos maravillosos modos de cálculo, como lo es también de muchos otros logros que son igualmente maravillosos.

Hay que señalar que el conde de Buffon (1707-1788) era un anglófilo muy fervoroso y también el traductor de *Vegetable staticks*, de Stephen Hales. Pero, después de todo, el poder evidente del cerebro de Isaac Newton fue el creador de la anglofilia intelectual en lugar de ocurrir al revés.

Otra confirmación extraordinaria del poder de dicho cerebro contribuyó en gran medida a la victoria de Newton y fue en su totalidad obra de los franceses. En los *Principia* (libro III, proposición 19) Newton había calculado, basándose en la fuerza de rotación de la Tierra en el Ecuador, que su diámetro ecuatorial debía rebasar su diámetro polar aproximadamente en un 0,44 por ciento o 27 kilómetros; de modo parecido en el caso de Júpiter, que giraba con más del doble de rapidez, se demostró que la disparidad de los diámetros era aún mayor (en la tercera edición se indicaba una proporción aproximada de 13 a 12, confirmada por las mediciones de los astrónomos). En Francia, sin embargo, los Cassini, partiendo de mediciones geodésicas extendidas a lo largo del meridiano de París desde el Canal hasta los Pirineos, llegaron a la conclusión exactamente opuesta: que el diámetro polar de la Tierra era el mayor. Después de que Maupertuis examinara esta incompatibilidad en 1733, la Academia de Ciencias decidió que debía resolverse con medidas de un grado de latitud tomadas en dos partes del globo muy distantes la una de la otra. Maupertuis, junto con Clariaut, se fue con un grupo al golfo de Botnia. La Condamine, junto con Bouguer, se fueron con otro grupo

9. Carta 17.

al Perú. Maupertuis partió en mayo de 1736 y estuvo ausente un año; hasta diciembre de 1739 no pudo anunciar el resultado: de acuerdo con la teoría dinámica de Newton, el grado en el norte lejano era más largo que el de París. Transcurrieron todavía unos años antes de que se comprobase que el grado en el Perú era más corto. Como dijo Voltaire en un pareado irónicamente ingenioso (pero no baconiano) dirigido a Maupertuis:

Vous avez confirmé dans des lieux pleins d'ennui
Ce que Newton connut sans sortir de chez lui.[10]

Estas expediciones gemelas, manifestaciones gloriosas de la riqueza y la pericia técnica de la ciencia francesa, eliminaron los últimos reparos serios, basados en datos, que impedían la aceptación universal de la mecánica de Newton.

Aceptación, es decir, como base para nuevas investigaciones. El propio Newton era muy consciente de que lo que había logrado en los *Principia* distaba mucho de ser perfecto. En la base misma de su teoría mecánica había, por ejemplo, un problema difícil y todavía no resuelto: la medición de la fuerza. La raíz del problema se remontaba a 1669, porque en tal fecha se había hecho aparente que en el choque inelástico el producto total de la masa por la velocidad se conservaba, mientras que en el choque elástico una cantidad más grande, la masa por la velocidad al cuadrado, se conservaba: la «fuerza» que faltaba había desaparecido en la deformación de los cuerpos inelásticos. De modo parecido, si se considera que la fuerza de un cuerpo que se mueve es proporcional a su velocidad, ello concuerda con la primera de las anteriores medidas; si (como prefería Leibniz) a la fuerza se la considera proporcional a la altura de la ascensión o del descenso, concuerda con la segunda medida. Leibniz dio a la primera (*momentum*) el nombre de «fuerza muerta», y a la segunda el de «fuerza viva» (*vis viva*). La mitad de la *vis viva* ($\frac{1}{2}\,mv^2$) es nuestra energía cinética. Desde 1686, año en que Leibniz condenó la medida de fuerza cartesiana (y después newtoniana), declarando que la *vis viva* contenía la única concepción verdadera y matemática de la fuerza, hasta 1743 hubo un debate vasto e incompleto sobre este asunto

10. «Por tediosos desiertos os visteis obligados a vagar / Para encontrar la verdad que Newton conocía en casa.»

de la definición. En 1743 puso fin a dicho debate el argumento de D'Alembert en el sentido de que ambas definiciones «funcionaban» matemáticamente, y que ni *mv* ni mv^2 eran definiciones con validez exclusiva de la fuerza. Las dos expresiones reflejaban sencillamente distintas maneras de contemplar la misma cosa, de modo que la disputa era sólo en torno a nombres en vez de realidades. Para evitar la confusión, lo mejor era evitar el uso de la palabra «fuerza» en el sentido antiguo de «fuerza» del «movimiento» de un cuerpo.

Hay, ni que decir tiene, otros ejemplos de problemas conceptuales que necesitaron mucha clarificación después de Newton, en especial mediante la introducción de la idea del «trabajo» hacia finales del siglo XVIII. Fue necesario ampliar y precisar los principios de la mecánica en relación con temas tales como la hidrodinámica, la fricción y el comportamiento de sistemas de cuerpos. Como ya hemos dicho en relación con la teoría de la Luna, hubo que hacer todavía mucho para llegar a la perfección de la mecánica celeste; finalmente, al terminar el siglo, la ciencia de la mecánica recibió su forma clásica definitiva en las obras de Joseph Louis Lagrange (1736-1813) y Pierre Simon Laplace (1749-1827). Entre sus predecesores y contemporáneos, en todos estos magníficos logros pos-*Principia*, sobresalen los nombres de analistas franceses, suizos y alemanes: la familia Bernoulli, Pierre Bouguer, Lazare Carnot, Clairaut, D'Alembert, Leonhard Euler y muchos más que estaban relacionados con las academias de París, Berlín y San Petersburgo. Ningún matemático británico puede compararse con ellos. A John Keill se le recuerda únicamente como paladín de Newton. La promesa juvenil de Roger Cotes fue alabada por Newton en un momento de amabilidad, pero Cotes murió a los 34 años de edad sin haber hecho nada digno de mención. Brook Taylor y James Stirling, recordados ambos como matemáticos puros, ciertamente no merecen ocupar más que un lugar de tercera categoría en la historia de la mecánica. Benjamin Robins (1707-1751), partidario tardío de Newton, enemigo enérgico de la *vis viva*, tenía más de ingeniero que de matemático. Sólo del escocés Colin Maclaurin (1698-1746), el último matemático británico que tuvo un tenue vínculo personal con Newton, puede decirse algo más positivo. Su *Treatise of fluxions* (1742) ha sido elogiado por su rigor y confirmó el uso singular que de este sistema newtoniano se hacía en Inglaterra; Ernst Mach escribió que esta obra señalaba «un avance muy importante» en la mecánica analítica más allá de la *Mechanica* (1736) de

Euler y «confiere a los cálculos de este tema un alto grado de simetría y perspicuidad».[11]

No se ha aclarado cuáles fueron las razones históricas de este derrumbamiento de las matemáticas británicas en vida de Newton y después de su muerte; desde luego, no fue ocasionado sencillamente por una falta total de interés —puesto que la actividad matemática de índole trivial atraía mucho apoyo— y aunque los ingleses no cultivaron el cálculo diferencial e integral de sus colegas continentales, no tenían por qué aislarse por completo (como de hecho hicieron). Lo que sin duda se advierte en Inglaterra es una marcada preferencia por interpretar a Newton en términos baconianos. Como la fama de Newton había aumentado enormemente en los años posteriores a la publicación de *Optice* (1706), había absorbido y subsumido todo lo que se hiciera antes que no chocase con el newtonismo. La filosofía mecanicista era newtoniana; la filosofía matemática tuvo su origen en Newton; la filosofía experimental era newtoniana también. No es que se olvidaran las opiniones de Galileo, Kepler, Boyle y Huygens ni que no se prestase atención a la complejidad del desarrollo prenewtoniano de la ciencia; era más bien que a estos hombres se les consideraba como precursores del verdadero fundador de la ciencia moderna, cada uno de los cuales había visto atisbos parciales de la verdad. Sobre todo, Newton había definido un *método* científico definitivo e infatigable allí donde los demás se habían limitado a buscar a tientas verdades determinadas.

El siglo XVIII comprendió que el método de Newton, al mismo tiempo que evitaba pretensiones engañosas de omnisciencia, ofrecía un camino que llevaba a verdades ciertas, indiscutibles. Evitando las hipótesis o, mejor dicho, dando a las hipótesis y las conjeturas su papel apropiado de estimuladoras de la investigación inductiva, distinguiendo rigurosamente entre las hipótesis y la teoría firme, confirmada (que Newton denominaba «doctrina»), colocaba a las primeras sobre una base de axiomas confirmados por la experiencia o por experimentos:

> Pues si cualquiera puede hacer una conjetura sobre la verdad de las cosas partiendo de la escueta posibilidad de las hipótesis, no veo cómo puede determinarse nada cierto en cualquier ciencia, pues

11. Ernst Mach, *The science of mechanics* [1893], Open Court Publishing Co., La Salle, Illinois, 1942, p. 562.

> es siempre posible imaginar más y más hipótesis, las cuales parecerán responder a nuevas dificultades.[12]

Una doctrina, sin embargo, no invoca ninguna hipótesis y se confirma por medio de experimentos. Estas reglas en apariencia sencillas fueron para muchos definiciones claras y suficientes del verdadero método de la ciencia, descubierto una vez para siempre. El matemático inglés William Emerson arguyó que no podía ser más que una broma sostener que la filosofía de Newton sería algún día suplantada; que podrá «sin duda ser mejorada, y ser llevada más adelante; pero que nunca podrá ser derrocada, a pesar de todos los esfuerzos de todos los Bernoulli, los Leibniz ...».[13] De hecho, la newtoniana fue la primera filosofía *positiva* en el sentido en que Auguste Comte empleó este término. Que Newton se abstuviera de atribuirle una causa a la gravitación era motivo de enhorabuenas más que de críticas. «Condenados como estamos a ignorar la esencia y la contextura interna de los cuerpos —escribió D'Alembert, anticipándose a Comte— el único recurso que le queda a nuestra sagacidad es intentar por lo menos comprender la analogía de los fenómenos, y reducirlos todos a un pequeño número de hechos primitivos y fundamentales.»[14]

Los eruditos modernos han alabado justamente la riqueza de percepción física de Newton, las especulaciones de gran alcance sobre átomos y estrellas que encuentran en sus manuscritos. No eran éstos los rasgos que sus sucesores inmediatos encontraban más admirables en las obras impresas que leían, ya fuera en sus manifestaciones deliberadas sobre el método o en sus ejemplos de investigación. Algunos afirmaban incluso que los pensamientos que Newton había expresado en forma de cuestiones en *Opticks* él ya sabía que eran realmente ciertos. Creían que Newton había desplegado ante sus lectores la interpretación de la naturaleza más cierta, más digna de confianza, que jamás pudiera formularse en vez de darles una estructura dependiente de presuposiciones metafísicas y como tal la acogieron de buen grado.

12. Newton a Pardies, 10 de junio de 1672, *Correspondence*, I, p. 164. Véase H. Guerlac, *Essays and papers in the history of modern science*, Johns Hopkins University Press, Baltimore & Londres, 1977, pp. 131-145.

13. Citado por L. L. Laudan en R. E. Butts y J. V. Davis, eds., *The methodological heritage of Newton*, Blackwells, Oxford, 1970, p. 104, nota.

14. Guerlac, *loc. cit.* (en nota 2), p. 141, citando el *Discours preliminaire* a la *Encyclopédie*.

La visión newtoniana de la naturaleza era en verdad rigurosa por partida doble, pues no sólo se basaba sólidamente en la inducción de la experiencia, sino que, además, poseía en su desarrollo el rigor del argumento matemático. Citando lo que en 1720 escribió William Gravesande, el primer newtoniano holandés:

> En física debemos descubrir las leyes de la naturaleza por medio de los fenómenos, luego por medio de la inducción probar que son leyes generales; todo lo demás debe tratarse matemáticamente. Quienquiera que examine seriamente sobre qué fundamentos está edificado este método de física descubrirá fácilmente que éste es el único verdadero, y que todas las hipótesis deben descartarse.[15]

Henry Pemberton (1694-1771), que preparó la tercera edición de los *Principia* (1726) y otro de los primeros popularizadores de Newton en su obra *View of Sir Isaac Newton's philosophy* (1728), explica de forma parecida que «la naturaleza de esos descubrimientos hacía imposible desmostrarlos basándose en otros principios que los geométricos», de ahí la necesidad de un libro como el suyo para iluminar al lector no matemático. Madame du Châtelet en su libro *Institutions de physique* (1740) explica más de una vez que el principio de la atracción —la gravitación— fue derivado matemáticamente por Newton de las leyes de Kepler, afirmación que, si no es estrictamente correcta desde el punto de vista histórico, al menos nos lleva a las raíces de las cosas en la mecánica como ciencia matemática. Una vez descubierto y defendido, el principio de la atracción podía considerarse como concepto y así lo aceptó y utilizó Stephen Hales, por ejemplo, pero por muy concepto útil que pudiera ser la atracción (como demostró ampliamente el propio Newton en la cuestión 31), resultaba perfectamente obvio que la atracción sólo podía *probarse* en la teoría matemática de la mecánica gravitacional.

Los comentaristas modernos han refinado, sin modificarla radicalmente, la opinión de que el gran logro metodológico de Newton consistió en unir los procesos inductivo y deductivo, esto es, el experimento y el método axiomático de la geometría, aunque son más conscientes de lo que podía ser Newton (ya que él nunca había leído las *Consideraciones y demostraciones*) de hasta qué punto había pre-

15. W. J. Gravesande, *Mathematical elements of natural philosophy* (trad. de J. T. Desaguliers), Londres, 1731[4], pp. XVI-XVII.

visto Galileo la necesidad de tal unión. E. A. Burtt definió del siguiente modo la esencia de innovación de Newton:

> Mediante la íntima unión de los métodos matemáticos y experimental, Newton creía haber aliado indisolublemente la exactitud ideal de uno a la constante referencia empírica del otro. *La ciencia es la formulación matemática exacta de los procesos del mundo natural.*[16]

Lo que pretendía Newton se comprende mejor estudiando su labor que leyendo sus *obiter dicta*, pues ciertamente nunca fue su propósito compilar un ensayo sobre la filosofía de la ciencia: Burtt, a decir verdad, se queja de que «sus palabras decepcionan por lo inadecuadas». Uno de los indicios directos más claros aparece cerca del comienzo de una obra publicada póstumamente, *El sistema del mundo*, donde Newton explica su propósito de «averiguar la cantidad y las propiedades de esta fuerza [gravitacional] partiendo de los fenómenos, y aplicar lo que descubramos en algunos casos sencillos como principios, mediante los cuales podamos investigar matemáticamente los efectos de los mismos en casos más complicados». Seguidamente elucida su propia expresión con una glosa: «Dijimos, matemáticamente, para evitar todas las cuestiones sobre la naturaleza o la cualidad de esta fuerza, la cual no se entendería que determináramos por medio de alguna hipótesis, y, por consiguiente, llamarla por el nombre general de una fuerza centrípeta...».[17] Podría expresarse lo mismo de forma más breve diciendo que las matemáticas, la ciencia de la cantidad, no se ocupan de la ontología. Postulemos una fuerza centrípeta, dice Newton, y luego exploremos en un grupo sistemático de proposiciones los movimientos que puedan surgir de ella.

Si eso es realmente lo que quería decir Newton, su afirmación es racional y galileana, pero choca un poco con las manifestaciones sobre las hipótesis que hemos citado antes. Porque, ¿acaso no es la fuerza

16. E. A. Burtt, *Methaphysical foundations of modern physical science* [1924], Routledge and Kegan Paul, Londres, 1949, p. 223; la cursiva está en el original. Cf. E. W. Strong en *Jour. Hist. Ideas*, 12 (1951), pp. 90-110.

17. F. Cajori, ed., *Principia*, de Newton, University of California Press, Berkeley, 1946, p. 550. Este célebre pasaje no figura en la edición latina de los *Systema* en los *Opuscula* de Newton, tomo II, Lausanne y Ginebra, 1744, y puede tratarse de una añadidura. El simple hecho de que estuviera en el *System* ya es curioso, pues se suponía que había sido redactado *methodo populari*. El libro III impreso de los *Principia*, que lo sustituyó, fue escrito *more mathematico*.

centrípeta una hipótesis matemática, comparable a la definición de Arquímedes de un fluido o a la de Galileo de un movimiento acelerado naturalmente, toda vez que no se declara que esté justificada por la inducción a partir de la experiencia? Es cierto que, como en el caso de Galileo, se demostrará *a posteriori* que las proposiciones matemáticas concuerdan con la experiencia, de tal manera que al final estaremos de acuerdo en que existe una fuerza gravitacional centrípeta, pero esto no es lo mismo que partir de axiomas probados experimentalmente, el método que Newton adoptó de hecho en *Opticks*. El legado metodológico newtoniano parece menos claro y confiado —al menos para los filósofos de la naturaleza no matemáticos— de lo que Burt pretende hacernos creer.

Además, dejando *Opticks* sin terminar y embarcándose en lo que sería una serie de treinta y una cuestiones, Newton pareció aprobar el método de las conjeturas que él mismo no había aceptado en los demás, siempre y cuando se mantuviera la distinción de la «doctrina». Las primeras preguntas son, de hecho, sencillas: «Cuestión 1. ¿Acaso no actúan los cuerpos a distancia sobre la luz, torciendo sus rayos ...?», pero al poco se convirtieron en pequeños ensayos experimentales: «Cuestión 10. ¿Acaso no es la llama un vapor, humo o exhalación calentada al rojo, esto es, tan caliente que brilla? ... Al destilar los espíritus calentados ... el vapor que asciende del alambique se encenderá en la llama de una bujía y se convertirá en llama ...», y así sucesivamente, con numerosos ejemplos químicos, a lo largo de dos páginas. Las últimas cuestiones se hacen más largas, al mismo tiempo que cada vez convence más la sugerencia de que una conjetura puede confirmarse recitando innumerables ejemplos en apariencia positivos. Para muchos ingleses, conocedores de su Bacon, su Boyle y sus *Psilosophical Transactions*, pero incapaces de comprender algo de los *Principia* excepto su escolio general de la conclusión, esta prosa era inspiradora. Una mayoría, probablemente, de los que hacían vehemente profesión del título de «newtonianos» no se molestaban en pretender que usaban el método experimental-matemático de Newton. Algunos, como los filósofos químicos Keill y Friend (p. 490), especularon en torno a la acción de las fuerzas atractivas; otros, como el absurdo Bryan Robinson (1680-1754), construyeron un elevado castillo de naipes utilizando como cimientos las alusiones a mecanismos etéreos que dejó Newton. De haber sabido que a Newton le interesaban sus fantasías, sin duda

también los alquimistas se habrían declarado newtonianos. Tal como señaló Bernard Cohen hace ya mucho tiempo,[18] era fatalmente fácil dividir allí donde Newton había unido, por lo que la ciencia matemática se fue en una dirección y la ciencia experimental en otra. *Opticks* parecía proporcionar autoridad para semejante división; ¿acaso el propio Newton no había llevado a cabo sus descubrimientos sobre la luz y los colores mediante una investigación puramente experimental? De manera que Hales —que en modo alguno es un caso único en este sentido— adopta su postura filosófica sobre una versión totalmente no matemática de la atracción:

> ... hay difundida a través de todos los cuerpos naturales, que se atraen mutuamente, una gran proporción de partículas que, como observa el primer gran autor de este importante descubrimiento, sir Isaac Newton, son susceptibles de ser despedidas de los cuerpos densos por efecto del calor o la fermentación en un estado vigorosamente elástico y permanentemente repelente: Y también de volver ... al interior de los cuerpos densos ... Es por medio de estas propiedades de las partículas de la materia que él resuelve los principales fenómenos de la naturaleza.[19]

Quizá nosotros nos inclinaríamos a decir que el propio Hales había hecho «este importante descubrimiento», el origen de la química neumática; pero qué curioso es el atisbo que nos da la imagen que de Newton tenía Hales; por supuesto, no es la de un matemático, ni la de un analista filosófico moderno. Sin embargo, tal como ha demostrado Cohen, algo parecido a esta extraña imagen era la que se hacía el médico y químico Herman Boerhaave (1668-1738) de Leiden, gran admirador de Newton, y también la que se hacían J. T. Desaguliers, asistente de Newton en sus experimentos de los últimos años, el traductor (y químico) Peter Shaw y, sin duda, Benjamin Franklin. Todos ellos tendían, hasta cierto punto, a hacer el descubrimiento «de que estas propiedades de los cuerpos, tales como la gravedad, las atracciones, y las repulsiones por medio de las cuales explicaremos a partir de aquí varios fenómenos, no son cualidades ocultas ni virtudes supuestas, sino que realmente existen» el núcleo central de la filosofía

18. I. Bernard Cohen, *Franklin and Newton*, American Philosophical Society, Filadelfia, 1956.
19. M. A. Hoskin, ed., *Vegetable staticks*, Oldbourne, Londres, 1961, p. XXVII.

newtoniana, probado por medio de experimentos. Cogieron el merengue creyendo que era el budín entero.[20]

No cabe duda de que ver a Newton bajo esta luz concordaba con la tradición empírica inglesa, puesto que le convertía en hermano filosófico de Robert Boyle, un Boyle cuya filosofía mecanicista se había visto enriquecida por los conceptos de atracción y repulsión. Como filósofo matemático, Newton no halló una acogida inteligente en Inglaterra. Algunos decían (como acabamos de ver en el caso de Gravesande) que los *Principia* mismos podían muy bien «demostrarse por medio de experimentos»: entonces sería posible comprender muy bien toda la filosofía newtoniana, la que hacían valer demostraciones experimentales convincentes, sin el menor asomo de fastidiosos teoremas y lemas. Semejante popularización constituye la negación del método newtoniano, pero no lo parecía en una época en la que los lectores competentes de los *Principia* jamás pasaron de ser unas pocas docenas. Y, desde luego, era cierto que la ciencia newtoniana sólo podía llegar a un público amplio si se presentaba de un modo no matemático.

Es inconcebible que Newton previera y buscase semejante resultado, o siquiera que viese la cuestión 31 como la piedra angular de su filosofía en algún sentido, ya que fue su última (1718) declaración científica de cierta importancia, escrita para ser leída como guía de la metodología. Lejos de ser *Opticks* el testimonio del propio Newton de la excelencia del método experimental cualitativo, abundan las pruebas de su esfuerzo por hacer que la estructura del libro fuese no sólo axiomática, sino tan cuantitativa y matemática como el tema permitiese. Esta parece ser la interpretación obligada de cierto número de comentarios que vemos en los libros de Newton y en su correspondencia, tales como, por ejemplo, el siguiente pasaje que aparece al final de la proposición III del libro I de la segunda parte de *Opticks*, donde Newton ha estudiado la proporcionalidad matemática de los rayos de color refractados:

> Y siendo estos teoremas admitidos en *Opticks*, habría oportunidad suficiente para ocuparse voluminosamente de esa ciencia de una manera nueva, no sólo enseñando las cosas que tiendan a la perfección de la visión, sino también determinando matemáticamen-

20. Cohen, *op. cit.*, p. 254, citando a Desaguliers, *Course of experimental philosophy*, I, 1734, p. 21.

te toda clase de fenómenos de los colores que pudieran producirse por refracciones. Para hacer esto no se requiere nada más que averiguar las separaciones de rayos heterogéneos, y sus diversas mezclas y proporciones en cada mezcla. Mediante esta forma de argüir inventé casi todos los fenómenos descritos en estos libros...

Como se hace en la lect. *de nuestro* autor. Óptica. *Parte I, secc. III y IV y parte II, secc. II.*

Debido a una extraña ironía del destino, la matematización de la teoría de la luz y de la óptica en el siglo XIX se fundaría en ese concepto físico de la luz como movimiento ondulatorio que Newton había rechazado —bajo una forma distinta, es cierto— por imposible; si bien esto hizo que gran parte de la exploración descriptiva del propio Newton quedase como ejemplo clásicamente válido de investigación experimental, también confirmó la división artificial de la filosofía natural de Newton en ramas «experimentales» y «matemáticas», como si la física hubiera sido y debiera ser una dicotomía. Esa no fue jamás la opinión del propio Newton.

Con todo, si, de modo más legítimo, clasificamos a los herederos inmediatos de Newton como «experimentadores» o «matemáticos» —aunque algunos, como Bouguer, eran buenos en calidad de ambos cosas—, está claro que los segundos no sólo trabajaban más auténticamente de acuerdo con la tradición de los *Principia*, sino también que su labor ha soportado mejor la prueba del tiempo. La tradición experimental newtoniana tal como la cultivaron Hales y los numerosísimos estudiosos de la electricidad del siglo XVIII, de Stephen Gray en adelante, era, huelga decirlo, perfectamente razonable y produjo innumerables descubrimientos notables, pero no produjo, ni en *Vegetable staticks* ni en *Experiments and observation upon electricity* (1751), de Benjamin Franklin, nada que realmente pudiera calificarse de ciencia newtoniana. Ciencia buena, desde luego, pero sólo newtoniana si a toda la ciencia buena hay que clasificarla como tal; porque el objetivo de la matematización de la naturaleza, fijado por Galileo y cumplido por Newton, había sido abandonado por completo. En realidad, los estudiosos de la electricidad ingleses en especial eran neocartesianos, con sus hipótesis de los fluidos y, una vez más, les tocó a los franceses la tarea de introducir un orden matemático newtoniano en la ciencia eléctrica.

Las otras muchas especulaciones nacidas más o menos directa-

mente de las cuestiones en términos de las partículas y sus facultades, virtudes y fuerzas, incluyendo las diversas hipótesis etéreas atractivas y repulsivas, que desempeñan funciones importantes en los escritos del siglo XVIII, tanto filosóficos como de popularización científica, no merecen que les dediquemos mucho tiempo. Los intentos de alcanzar los substratos más hondos de la comprensión física mediante semejantes especulaciones fueron un fracaso, y resulta difícil creer que el propio Newton esperase que fuesen un éxito, sobre todo en vista de que pocos de estos autores hicieron caso omiso de su ruego en el sentido de que prosiguiera la elucidación *experimental* de estos difíciles problemas. Sin embargo, vale la pena señalar que una tendencia entre estas especulaciones —haciendo interminables permutaciones de los mismos artificios conceptuales— vinculados de manera especial a los nombres de Roger Boscovich y Joseph Priestley, reaccionó poderosamente contra el materialismo, favoreciendo la ontología de las fuerzas como base de los fenómenos. Aprovechando una indicación del propio Newton, curaron la herejía que era pensar que la actividad de la naturaleza podía depender de la pesadez de la materia, para lo cual imaginaron a ésta como una especie de artefacto creado por la distribución espacial de las fuerzas. De esta manera desapareció el problema de la acción a distancia entre átomos. Ésta era una idea con futuro.

Tal como ha demostrado Arnold Thackray,[21] la aplicación a la química de una teoría cualitativa de la atracción fue cuando menos tan sostenida y perfeccionada como su aplicación a la electricidad: los químicos teóricos apoyaron el concepto de las fuerzas, mientras que los estudiosos de la electricidad adoptaron la idea de un fluido elástico y sutil o éter. Aunque los escritos de Keill y Friend no aportaron ningún modelo específico adecuado, la cuestión 31 y otros vehículos subsiguientes difundieron ampliamente en Inglaterra y en el extranjero el principio general según el cual las reacciones químicas podían interpretarse como redistribuciones de partículas (de Boyle) y que tales redistribuciones eran ocasionadas por fuerzas newtonianas de corto alcance. Buffon, traductor newtoniano y luego naturalista prolijo, también promovió esta idea y su «visión afectó profundamente a Guyton de Morveau, Lavoisier, Fourcroy y a toda la escuela de

21. Arnold Thackray, *Atoms and powers*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1970.

químicos franceses»,[22] esto es, a los revolucionarios que sustituyeron el flogisto por el hidrógeno y el antiflogisto por el oxígeno, alteraron toda la nomenclatura de la ciencia y causaron una revolución química. Estos principios newtonianos no tenían nada que ver con la investigación química en el laboratorio y con la identificación de los elementos, pero continuaron formando la base de la química experimental en la filosofía de la naturaleza hasta que el atomo ponderable de la química de John Dalton sustituyó a la partícula fundamental newtoniana a principios del siglo XIX. A Dalton no le interesaban las fuerzas atractivas y repulsivas entre los átomos, si bien las revistió de atmósferas de calor; aunque él (según parece) no era muy diestro con la balanza, introdujo la estática química y relegó la dinámica química a un segundo plano, en el que permaneció durante tres generaciones. Fue el fin de lo que Thackray ha denominado «el sueño newtoniano de una mecánica química cuantificada»:

> La obra de Dalton consistió en cambiar todo el campo de debate filosófico entre los químicos ... La sustitución del empeño infructuoso de calificar las fuerzas del *mecanismo* químico por su asombrosamente afortunada cuantificación de peso de las *unidades* químicas socavó todo el programa newtoniano.[23]

Así, pues, si echáramos una vistazo al mundo científico de los primeros años del siglo XIX, encontraríamos el mundo newtoniano de fuerzas macroscópicas descrito elegantemente con lenguaje matemático, justificado de manera precisa y repetida por la experiencia. Los astrónomos en especial poseían un dominio virtualmente completo de la dinámica planetaria. Muy distinto era el caso de aquel mundo microscópico en el que Newton había entrado por la puerta del experimento y la analogía y examinado por medio de la conjetura: las ciencias de la química, de la luz y de la electricidad ya andaban felizmente por senderos neonewtonianos. Relatar la evolución conceptual y matemática de estas diversas ramas de la ciencia, que todavía eran esencialmente descriptivas en 1800, así como su logro de una visión del microcosmos distinta de cualquier cosa imaginada por Newton,

22. *Idem*, en D. S. L. Cardwell, ed., *John Dalton and the progress of science*, Manchester University Press, Manchester, 1968, p. 101.
23. *Idem*, *Atoms and powers*, p. 276.

sería lo mismo que escribir gran parte de la historia de la ciencia física durante lo siglos XIX y XX.

Es ya una preogrullada decir que el desarrollo de la ciencia natural ha sido el rasgo más significativo y perdurable de la civilización occidental. Las ideas científicas occidentales han penetrado, al menos parcialmente, en la cultura de todos los pueblos, y casi todas han aportado algo a su evolución; la tecnología científica occidental ha influido en la vida de todos los pueblos. Muchas otras cosas que parecían esenciales para la vida de Occidente —el cristianismo, la industria capitalista, la libertad personal y la democracia política— han sido rechazadas por las naciones no europeas. Incluso en Occidente, la sociedad que dio a luz la ciencia y que estimuló su crecimiento ha desaparecido del todo, y, peso a ello, la ciencia ha sobrevidido y prosperado. En un momento dado pareció que debía continuar sobreviviendo, tras haber establecido para sí misma una posición inviolable fueran cuales fuesen las vicisitudes de la estructura social y de la ideología. Eso parece ahora mucho menos cierto. Los enemigos de la exploración científica racional de la naturaleza son más numerosos y más fuertes que hace treinta años, y hoy en día muchas personas inteligentes negarían que las palabras «verdad científica» tengan algún sentido definible o absoluto. En el caso extremo, algunos filósofos, al parecer, consideran que la idea científica de la naturaleza es un artefacto de la sociedad que la alberga.

Exactamente lo contrario era el principio que guiaba a la revolución científica. Los hombres que hemos estudiado en el presente libro creían en una creación natural, ordenada y real, independiente del hombre pero conocible racionalmente por él de tal modo que era posible descubrir sus propiedades y leyes. Habrían rechazado, tanto por irreligiosa como por antifilosófica, la idea de que la naturaleza pudiera ser, en algún sentido fundamental, inconocible e indeterminada. Su creencia predominó universalmente hasta hace cosa de medio siglo y, aunque ya no está justificada por los principios matemáticos de la filosofía natural, en la práctica sigue siendo el substrato de gran parte de la labor científica. En vista de ello, es una lástima que entendamos tan poco, incluso ahora, la génesis de la ciencia moderna. Vemos que civilizaciones anteriores a la de la Europa moderna respondieron, cada una a su manera, al desafío del medio natural, tanto práctica (con el fin de poder vivir) como intelectualmente. Ninguna

de ellas consiguió que su idea de la naturaleza se liberase de las complejidades e incertidumbres del debate filosófico y de las ideas preconcebidas de la religión. Ninguna pasó de hacer un leve inicio en lo que se refiere a la comprensión matemática de la naturaleza ni descubrió ningún procedimiento que permitiera hacer distinciones satisfactorias entre proposiciones más o menos bien fundadas acerca del orden natural. Tampoco la gama de conocimientos basados en datos que poseían estas civilizaciones primitivas llegaba más allá de la experiencia normal de los hombres. De semejante estado intermedio del conocimiento, un estado entre el primitivismo y la ciencia, sólo han podido escapar la sociedad europea moderna y aquellas otras sociedades que han estado sometidas a su influencia durante los dos últimos siglos. Es este paso singular de la racionalidad filosófica a la racionalidad científica lo que los historiadores no acaban de comprender, de la misma manera que los filósofos no se ponen de acuerdo sobre la solución del problema (que, por supuesto, está relacionado con ello) de la crisis de la lealtad a un complejo de principios, explicaciones y métodos, crisis que conduce a la transferencia de la fe a otro complejo.

Todas las explicaciones históricas son problemáticas. Los historiadores de la ciencia no se hallan en mucha desventaja en comparación con otros historiadores que intenten explicar (pongamos por caso) la Revolución Francesa o la Rusa. Y del mismo modo que los historiadores políticos podrían considerar necesario —después de explicar la evolución de determinadas condiciones sociales y económicas, así como la presión de ciertas necesidades políticas en un momento dado— superponer una crónica de ideas y principios que de pronto parecieron exigir su puesta en práctica, aunque sólo fuera porque actuaban en la mente de un Robespierre o de un Lenin, también el historiador de la ciencia tiene que considerar, dentro de cierta forma de sociedad (la cual, de diversas maneras materiales o intelectuales permite o prohíbe esta o aquella clase de investigación), el papel de las ideas, ideas que se mueven linealmente a través del tiempo, cambiando su carácter y su fuerza a medida que evolucionan y se modifican. En este libro hemos tratado de ideas más que de la sociedad y de individuos concretos más que de las masas anónimas. Creo que sólo de esta manera podemos comprender como es debido la marcha del cambio científico y, para el caso, del cambio político.

Muchos admiraron a Newton, muchos más vitorearon a Lenin; sin aquellos que leen y aquellos que vitorean, las revoluciones nunca tendrían lugar. Pero sin ideas no habría ningún Newton o ningún Lenin en la historia.

ÍNDICE ALFABÉTICO

ÍNDICE

Este libro, un clásico en los países anglosajones, es fundamental para el conocimiento y comprensión de la «revolución científica», aquel conjunto de trascendentales cambios que, en los siglos XVI y XVII, acabaron con antiguas tradiciones y propiciaron la búsqueda de una nueva filosofía de la naturaleza. El profesor Hall —que valora aquí los estudios más sólidos producidos por la investigación de la historia de la ciencia en los últimos años— sitúa los hechos que conforman esa revolución en su contexto histórico y explica la aportación que hombres como Copérnico, Galileo, Kepler, Descartes, Boyle o Newton hicieron al surgimiento de la ciencia moderna, analizando sus obras y su legado histórico con un lenguaje riguroso pero ameno y asequible al lector no especializado.